

Grado en Ingeniería Mecánica  
2017-2018

*Trabajo Fin de Grado*

# “Diseño, análisis y prototipado de un mandrino para sujeción de piezas”

---

Manuel Castañar Real

Tutor

Enrique Soriano Heras

Leganés, julio de 2018



Esta obra se encuentra sujeta a la licencia Creative Commons  
**Reconocimiento – No Comercial – Sin Obra Derivada**



## AGRADECIMIENTOS

Primero quiero agradecer a mis padres haberme brindado la oportunidad de realizar todos los proyectos que me he propuesto. Siempre, al igual que mis hermanas, han apoyado mis decisiones y han confiado en mí.

Pero sobre todo quiero dedicar y agradecer este proyecto a mi capitana, porque, aunque no soy filósofo, has logrado que palpe con mis propias manos el “Kósmos noetós” gracias a tu “sofia”. Siempre has sabido estar en los buenos y en los no tan buenos momentos de mi vida. Mi guía, mi consejera, mi aliciente, mi “eros”, mi “agapē”, mi “Éter”. Solo me salen palabras de agradecimiento por regalarme tu tiempo. Todos mis logros y proyectos siempre estarán firmados por las siglas RCJ.

A mis compañeros de piso por estar siempre dispuestos a echarme una mano. Pero sobre todo a Daniel, porque sin tu ayuda no hubiera podido completar este proyecto, eres todo un ejemplo de honestidad.

A mi amigo Maiquel, porque siempre ha estado en mi vida para apoyarme y sobre todo para confiar en todo lo que me he propuesto. Gracias por ofrecerme una vía de escape siempre que lo he necesitado.

A todos los que no he nombrado y han aportado ese granito de arena solo me queda decirles que “¡GRÀCIS!”





## RESUMEN

La fabricación aditiva es considerada actualmente como una de las innovaciones digitales más trascendentes en el transcurso de la Cuarta Revolución Industrial. Esta técnica permite realizar réplicas volumétricas en diferentes materiales a partir de un Diseño Asistido por Computador (CAD).

En el campo del mecanizado, el uso de mandriles expansibles reviste una gran importancia, especialmente en las operaciones de torneado. El diseño de soluciones que permitan una mejora eficiente de estos sistemas se ha convertido en una necesidad a explotar.

El objetivo del proyecto es realizar un estudio de diseño, análisis y prototipado de un mandrino especial de sujeción de piezas por expansión, fabricado en un compuesto plástico, compatible con el modelado por deposición fundida de bajo coste. De este modo, el proyecto persigue estudiar en profundidad las posibilidades mecánicas que ofrece el sistema de sujeción diseñado para procesos de mecanizado por torneado y, para ello, realiza una comparación entre los compuestos plástico y los aceros contemplados en la normativa vigente.

Para tales fines, se han implementado varios análisis de esfuerzos tendentes a comparar la fabricación de las pinzas expansibles de sujeción en diferentes materiales. El comportamiento de la pinza diseñada se ha evaluado mediante análisis por el Método de Elementos Finitos en estado estático y en estado de contacto no lineal.

**Palabras clave:** diseño, mandrino, mecanizado, análisis, impresión, pinza expansible, Método de Elementos Finitos, Solid Edge, ANSYS Workbench.



## ABSTRACT

Additive manufacturing is currently considered one of the transcendental digital innovations in the course of the Fourth Industrial Revolution. This technique allows making volumetric replicas in different materials using a Computer Aided Design.

In the field of machining processes, the use of expandable mandrels has a great importance, especially when it comes to turning operations. In this regard, the design of solutions to boost the efficiency of these systems has become a need to be exploited.

The main objective of the project is to carry out a study of the design, analysis and prototyping of a special mandrel for holding pieces by expansion, made of a plastic compound, compatible with low cost fused deposition modelling. Therefore, the project aims to study in depth the mechanical possibilities offered by the clamping system designed for machining processes by turning. Then, a comparison shall be made between the plastic compounds and the steels contemplated in the current regulations.

For these purposes, several stress analyses shall be implemented to compare the manufacture of the expandable clamps of subjection in different materials. Finally, the behaviour of the designed clamp will be evaluated by analysis using the Finite Element Method in a static state and in a non-linear contact state.

**Keywords:** design, mandrel, machining process, analysis, printing, expandable clamp, Finite Element Method, Solid Edge, ANSYS Workbench.



# ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>1. El mecanizado .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Elementos que componen el proceso de mecanizado .....</b>	<b>2</b>
1.1.1. Pieza/producto final .....	3
1.1.2. Herramienta .....	3
1.1.3. Máquina-herramienta .....	4
1.1.4. Utillaje .....	4
1.1.5. Sistema de control .....	5
<b>1.2. Movimientos en el arranque de viruta .....</b>	<b>5</b>
<b>1.3. Parámetros tecnológicos de corte .....</b>	<b>6</b>
1.3.1. Velocidad de corte ( $V_c$ ) .....	6
1.3.2. Avance .....	7
1.3.3. Profundidad de corte .....	7
1.3.4. Magnitudes de viruta .....	7
<b>1.4. Mecanizado con filos geoméricamente determinados .....</b>	<b>8</b>
1.4.1. Aserrado .....	8
1.4.2. Brochado .....	9
1.4.3. Cepillado .....	9
1.4.4. Fresado .....	10
1.4.5. Mandrinado .....	11
1.4.6. Mortajado .....	11
1.4.7. Punteado .....	11
1.4.8. Taladrado .....	11
1.4.9. Torneado .....	12
<b>1.5. Sistemas de sujeción de piezas en un torno .....</b>	<b>12</b>
1.5.1. Platos centradores de garras .....	12
1.5.2. Montaje entre puntos .....	13
1.5.3. Lunetas .....	14
1.5.4. Pinzas o boquillas expansibles .....	15
1.5.5. Platos planos con útiles especiales .....	16
<b>2. Impresión 3D .....</b>	<b>17</b>
<b>2.1. Tecnologías de deposición de material .....</b>	<b>17</b>

2.2.	Tecnología láser .....	17
2.3.	Otro tipo de tecnologías .....	18
2.4.	La impresora 3D .....	19
3.	Método de Elementos finitos.....	21
3.1.	Introducción al Método de Elementos Finitos .....	21
3.2.	Historia del Método de Elementos Finitos .....	22
3.3.	Conceptos generales del método .....	23
3.4.	Principios generales para un continuo elástico .....	24
3.4.1.	Principio de los Trabajos Virtuales .....	24
3.4.2.	Función interpolación .....	24
4.	Planteamiento del problema y metodología .....	26
4.1.	Planteamiento del problema .....	26
4.2.	Metodología.....	27
5.	Estudio del giro en la pinza expansible .....	30
6.	Modelo analítico para hallar las fuerzas de sujeción.....	34
6.1.	Estudio de fuerzas para contacto pinza-pieza plástico-plástico .....	39
6.2.	Estudio de fuerzas para contacto pinza-pieza plástico-acero .....	41
6.3.	Estudio de fuerza para contacto pinza-pieza en acero-acero .....	42
6.4.	Estudio de fuerzas para contacto pinza-pieza en acero-plástico .....	43
7.	Análisis de la pinza expansible en estado estático.....	44
7.1.	Pinza fabricada en ácido poliláctico (PLA Premium) .....	46
7.2.	Pinza fabricada en ácido poliláctico (PLA PolyMax) .....	48
7.3.	Pinza fabricada en Nylon.....	49
7.4.	Pinza fabricada en ABS .....	50
7.5.	Pinza fabricada en Acero.....	51
7.6.	Resultados .....	52
8.	Estudio no lineal de la pinza expansible.....	55
8.1.	Estudio inicial de no linealidad.....	56
8.1.1.	Pinza expansible compuesta por material plástico .....	57
8.1.2.	Pinza expansible compuesta por un material de acero .....	58
8.2.	Estudio de contacto entre la pinza expansible y la pieza para mecanizar .....	61
8.2.1.	Pinza en PLA y pieza en PLA .....	62
8.2.2.	Pinza en PLA y pieza en acero .....	64

8.2.3.	Pinza en acero y pieza en acero .....	66
8.2.4.	Pinza en acero y pieza en PLA .....	68
<b>9.</b>	<b>Fabricación mediante deposición fundida de bajo coste .....</b>	<b>71</b>
9.1.	Selección del modelo de fabricación .....	71
9.2.	Análisis detallado del diseño del modelo final.....	78
9.3.	Detalles de impresión .....	80
9.4.	Mecánica de montaje .....	82
9.5.	Pinzas expansibles.....	83
<b>10.</b>	<b>Presupuestos.....</b>	<b>86</b>
10.1.	Costes directos .....	86
10.1.1.	Coste personal.....	86
10.1.2.	Costes de licencias .....	87
10.1.3.	Coste de materiales y equipos.....	88
10.1.4.	Coste eléctrico.....	89
10.2.	Costes indirectos .....	90
10.2.1.	Otros costes.....	90
10.3.	Resumen de costes .....	90
<b>11.</b>	<b>Análisis y resultados .....</b>	<b>92</b>
11.1.	Adecuación a la normativa vigente.....	92
11.1.1.	Norma UNE-EN 1550:1998+A1:2008.....	92
11.1.2.	Norma UNE-ISO 702-1:2011 .....	100
11.1.3.	Norma de adaptación del pistón.....	100
11.2.	Análisis de la pinza expansible en estado estático .....	103
11.3.	Análisis de contacto no lineal de la pinza expansible .....	104
11.3.1.	Estudio de contacto entre la pinza expansible y el plato cónico.....	104
11.3.2.	Estudio de contacto entre la pinza expansible y una pieza geométricamente determinada.....	105
<b>12.</b>	<b>Conclusión .....</b>	<b>108</b>
12.1.	Futuras líneas de investigación .....	108
<b>13.</b>	<b>Bibliografía.....</b>	<b>110</b>





## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Herramientas con filos geoméricamente determinados .....	2
Figura 2: Filos de herramientas con filos geoméricamente determinados .....	2
Figura 3: Ilustración de una muela abrasiva, vista general y microscópica .....	2
Figura 4: Magnitudes de viruta obtenida y arrancada.....	8
Figura 5: Aserrado manual .....	9
Figura 6: Formas comunes de brochado .....	9
Figura 7: Formas comunes de brochado .....	10
Figura 8: Imagen que muestra el avance de la herramienta en un proceso de mecanizado por fresado .....	10
Figura 9: Representación gráfica de un proceso de taladrado .....	11
Figura 10: Representación de un proceso de mecanizado denominado torneado .....	12
Figura 11: Plato de garras.....	13
Figura 12: Montaje entre punto con platos y perros de arrastre .....	14
Figura 13: Montaje entre punto con arrastradores frontales.....	14
Figura 14: Luneta fija y luneta móvil .....	15
Figura 15: Mandriles expansibles de pinza .....	15
Figura 16: Ilustración del software Cura empleado para la impresión de las piezas del prototipado del mandrino para sujeción de piezas por expansión .....	20
Figura 17: Representación gráfica del cálculo de reacciones en una pieza por el MEF .	21
Figura 18: Dominio "V" .....	23
Figura 19: Pinza de sujeción por deformación elástica.....	26

Figura 20: Análisis MEF Solid Edge ST9.....	28
Figura 21: Descripción procesos ANSYS Workbench V16 .....	28
Figura 22: Mallado ANSYS Workbench V16.....	29
Figura 23: Ilustración representativa de las fuerzas de actuación en un plato porta-pinza expansible .....	34
Figura 24: Variación angular en el recorrido del plato cónico .....	44
Figura 25: Fuerza de reacción en el mandrino .....	48
Figura 26: Representación del modelo I en ANSYS .....	55
Figura 27: Representación del modelo II en ANSYS .....	56
Figura 28: Contacto no lineal entre la pinza y el plato cónico .....	56
Figura 29: Tensiones de Von Mises para pieza plástica .....	57
Figura 30: Representación del punto de concentración de tensiones en pieza plástica ..	58
Figura 31: Diagrama de deformaciones en pieza plástica.....	58
Figura 32: Propiedades del Steel Structural ANSYS.....	59
Figura 33: Tensiones de Von Mises para pieza de acero .....	60
Figura 34: Representación del punto de concentración de tensiones en pieza de acero .	60
Figura 35: Diagrama de deformaciones para pieza de acero.....	61
Figura 36: Representación del contacto entre pinza-pieza.....	62
Figura 37: Diagrama de tensiones pinza plástica y pieza plástica.....	63
Figura 38: Diagrama de deformaciones pinza plástica y pieza plástica .....	64
Figura 39: Diagrama disipación de energía pinza plástica y pieza plástica .....	64
Figura 40: Diagrama de tensiones pinza plástica y pieza en acero.....	65

Figura 41: Diagrama de deformaciones pinza en acero y pieza plástica .....	66
Figura 42: Diagrama disipación de energía pinza plástica y pieza en acero .....	66
Figura 43: Diagrama de tensiones pinza en acero y pieza en acero .....	67
Figura 44: Diagrama de deformaciones pinza en acero y pieza en acero .....	68
Figura 45: Diagrama disipación de energía pinza en acero y pieza en acero .....	68
Figura 46: Diagrama de tensiones pinza acero y pieza plástica .....	69
Figura 47: Diagrama de deformaciones pinza en acero y pieza plástica .....	69
Figura 48: Diagrama disipación de energía pinza en acero y pieza plástica .....	70
Figura 49: Vista I prototipado mandril 1 .....	71
Figura 50: Vista II prototipado mandril 1 .....	71
Figura 51: Vista I prototipado mandril 2 .....	72
Figura 52: Vista II prototipado mandril 2 .....	72
Figura 53: Plano despiece prototipado mandril 2 .....	73
Figura 54: Vista I con rayos X de estructura de sustentación de piezas .....	75
Figura 55: Vista II con rayos X de estructura de sustentación de piezas .....	75
Figura 56: Vista I prototipado mandril final .....	76
Figura 57: Vista II prototipado mandril final .....	76
Figura 58: Vista detalle de orificios en el plato cónico .....	78
Figura 59: Vista detalle del pistón .....	79
Figura 60: Vista detalle de la pinza expansible .....	80
Figura 61: Vista detalle sistema de amarre del pistón .....	80

Figura 62: Propiedades de impresión en programa Cura .....	81
Figura 63: Pinza expansible D25 .....	84
Figura 64: Pinza expansible D30 .....	84
Figura 65: Pinza expansible D35 .....	85
Figura 66: Elementos mecánicos que componen un sistema de fijación de un torno ....	94
Figura 67: Orificios de salida de flujo de aire en el diseño del madrino para sujeción de piezas por expansión .....	99
Figura 68: Ilustración de la adaptación de un plato de garras a una nariz de husillo: 1- Placa adaptadora del plato de garras. 2- Tornillo SHCS. 3- Plato de garras. 4- Tornillo SHCS.....	100
Figura 69: Imagen representativa de las fuerzas que actúan sobre la pieza expansible del mandril .....	102
Figura 70: Ejemplo que muestra el rango de operación de presiones en un pistón neumático de un fabricante.....	102

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Características de corte con herramienta en un torneado de compuestos plásticos .....	31
Tabla 2: Propiedades de corte de distintos materiales .....	33
Tabla 3: Coeficientes de fricción estáticos .....	38
Tabla 4: Ficha de características técnicas de los materiales empleados para la fabricación de la pinza .....	46
Tabla 5: Composición química acero C45E .....	51
Tabla 6: Especificaciones técnicas Prototipado Mandril 2 .....	74
Tabla 7: Especificaciones técnicas Prototipado Mandril Final .....	77
Tabla 8: Coste personal .....	87
Tabla 9: Coste de licencias .....	88
Tabla 10: Coste de materiales y equipos .....	88
Tabla 11: Coste eléctrico .....	90
Tabla 12: Otros costes .....	90
Tabla 13: Resumen de costes .....	91
Tabla 14: Especificaciones técnicas predeterminadas .....	95
Tabla 15: Especificaciones técnicas pinza expansible .....	97
Tabla 16: Resultados Análisis de esfuerzos en estado estático .....	103



## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Coeficientes de fricción de compuestos plásticos .....	37
Gráfico 2: PLA Premium Fuerza-Deformación .....	47
Gráfico 3: PLA Premium Tensión-Desplazamiento .....	47
Gráfico 4: PLA PolyMax Fuerza-Desplazamiento .....	49
Gráfico 5: PLA PolyMax Tensión-Desplazamiento .....	49
Gráfico 6: Nylon Fuerza-Desplazamiento.....	50
Gráfico 7: Nylon Tensión-Desplazamiento.....	50
Gráfico 8: Acero C45 Fuerza-Desplazamiento .....	52
Gráfico 9: Acero C45 Tensión-Desplazamiento .....	52
Gráfico 10: Resumen I curvas Fuerza-Desplazamiento.....	53
Gráfico 11: Resumen II curvas Fuerza-Desplazamiento .....	53
Gráfico 12: Resumen I curvas Tensión-Desplazamiento.....	54
Gráfico 13: Resumen II curvas Tensión-Desplazamiento .....	54
Gráfico 14: Desequilibrio específico residual permisible para diferentes niveles clase G según la Norma ISO 1940-1 .....	96





## **1. El mecanizado**

Los procesos de mecanizado representan una actividad productiva muy importante en las operaciones de fabricación de la industria. Entender adecuadamente estos procesos es decisivo para fijar límites y establecer mejoras en los sistemas de producción.

Se entiende por mecanizado el conjunto de operaciones que permiten transformar la materia prima mediante la eliminación de material. Estas modificaciones pueden causar cambios en el tamaño, la forma o la estética del producto. Para la obtención de piezas determinadas suele ser necesario realizar varias operaciones de mecanizado.

La fabricación de piezas por mecanizado se llevará a cabo a partir de productos semielaborados (lingotes, barras, tochos, piezas conformadas por foja o moldeo) que sufrirán una serie de transformaciones. El resultado se traducirá en una serie de productos finales o semielaborados que requerirán algún tipo de operación futura.

Según el método empleado para conseguir eliminar material pueden diferenciarse dos categorías de procesos.

- Procesos convencionales. El material se eliminará empleando fundamentalmente medios mecánicos.
- Procesos no convencionales. El material se eliminará empleando otros medios diferentes a los mecánicos, tales como eléctricos, físico-químicos, etc.

En el mecanizado por arranque de viruta se obtienen las dimensiones y las superficies que describen el aspecto que se desea conseguir en una pieza. Este mecanizado se consigue arrancando partes del material en forma de viruta, gracias al uso de herramientas de filo o medios mecánicos.

Si se analiza la configuración que presentan los filos de herramientas, los procesos de fabricación por arranque de viruta se clasifican en:

- Procesos de arranque de viruta con filos geométricamente determinados.

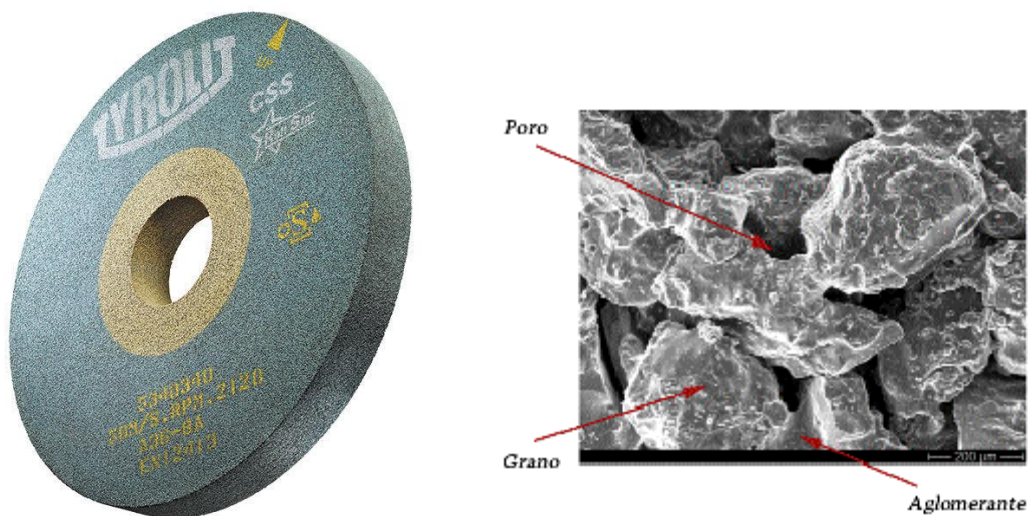


*Figura 1: Herramientas con filos geoméricamente determinados*



*Figura 2: Filos de herramientas con filos geoméricamente determinados*

- Procesos de arranque de viruta con filos no determinados. Filos formados por granos abrasivos que no presentan formas geométricas determinadas



*Figura 3: Ilustración de una muela abrasiva, vista general y microscópica*

### **1.1. Elementos que componen el proceso de mecanizado**

Un proceso de mecanizado puede desarrollarse a partir de un trabajo manual o mediante el uso de máquinas.

Un mecanizado manual tiene lugar gracias a la acción de una persona física mediante el uso de herramientas para mecanizado manual, tales como: lima, buril, segueta, cincel.

El uso combinado de fuerza y maña serán claves para asegurar un desarrollo correcto de esta técnica.

En el mecanizado mediante el uso de máquinas es el más común en las industrias y para su desarrollo adecuado es necesario que intervengan los siguientes elementos:

- Pieza/producto final
- Herramienta
- Máquina-herramienta
- Utillaje
- Sistema de control

A continuación, se definirán brevemente estos componentes y se señalarán sus características principales.

#### 1.1.1. Pieza/producto final

La pieza corresponde al conjunto de transformaciones que ha sufrido el material original para dar lugar al producto final. Este conjunto de modificaciones se ha implementado en operaciones de mecanizado. El material que sobredimensiona la pieza se elimina en una serie de procesos sucesivos que permiten aproximarse al producto final. El producto resultante debe cumplir unas especificaciones dimensionales de diseño determinadas.

No obstante, solo debe cumplir unas especificaciones dimensionales, también estará sometido a unas restricciones en sus propiedades mecánicas.

#### 1.1.2. Herramienta

La herramienta es un elemento mecánico encargado de entrar en contacto con la pieza para originar una eliminación de material.

La herramienta constará de uno o varios filos o aristas normalmente planas. Dentro de estas aristas las superficies que presentan mayor relevancia es la cara de incidencia, que queda enfrentada con la superficie de mecanizado de la pieza, y la cara de desprendimiento, cuyo objetivo principal consistirá en separar la viruta o material sobrante del producto que se desea mecanizar.

Existe un gran número de herramientas debido a que cada una se ajusta a unas operaciones determinadas. Sin embargo, se pueden clasificar dos grandes grupos, por un lado, las herramientas monofilas, empleadas en operaciones de torneado, y por otro lado las herramientas multifilo, empleadas en operaciones de fresado. Cada herramienta consta de una parte denominada no activa, esta parte presenta como objetivo la correcta fijación a los elementos de sujeción de la máquina.

Si se atiende a cómo se ha construido la herramienta, se pueden diferenciar dos tipos: herramientas enterizas, en las que predomina un único material, y las herramientas de plaquitas, donde existen varios materiales en su composición. Estas herramientas presentan unas palcas que están unidas al mango o cuerpo de las herramientas mediante uniones mecánicas o soldaduras. Además, presentan materiales con mejores comportamientos mecánicos que la herramienta.

#### 1.1.3. Máquina-herramienta

Son unidades que permiten colocar y sujetar las herramientas y las piezas a mecanizar. Describen una serie de movimientos que originan un arranque de material sobrante en forma de viruta.

Pueden diferenciarse de forma genérica una serie de elementos comunes dentro de estas unidades:

- Bancada. Es un tipo de estructura portante en la que se disponen los elementos.
- Guías. A través de las guías se desplazan los elementos móviles de una máquina.
- Accionamientos y transmisiones. Se componen principalmente de motores eléctricos que sirven para transmitir movimiento a los elementos que presentan movilidad dentro de la máquina.
- Elementos de maniobra.
- Instalaciones de refrigeración y lubricación.

#### 1.1.4. Utillaje

Se define como un conjunto mecánico que incluye la localización y la fijación de las piezas además de presentar una capacidad para soportar las fuerzas existentes durante el

proceso de fabricación. Presenta como principal objetivo optimizar las operaciones durante un proceso de fabricación.

Actualmente, la utilización de utillajes en la fabricación busca un mayor grado automatización, flexibilidad y reconfiguración. Comúnmente son diseñados como subsistemas, aunque su alcance influye en el resultado final, afectando a factores esenciales como la precisión, calidad o costes de fabricación.

#### 1.1.5. Sistema de control

Son sistemas encargados de controlar los movimientos y desplazamientos relativos que pueden tener lugar entre pieza y herramienta. Pueden distinguirse dos tipos de sistemas de control. Por un lado, diferenciamos un tipo de sistema de control en máquinas convencionales, donde el control suele ser regido por las acciones que desarrolla un operario sobre los dispositivos. Por otro lado, existe el control numérico, que constituye un medio de automatización que desarrolla operaciones a partir de una información alfanumérica, regida por unas normas determinadas e inducida en equipos de control a partir de diversos medios.

### **1.2. Movimientos en el arranque de viruta**

Para que se origine el mecanizado es fundamental realizar adecuadamente movimientos relativos entre la herramienta y la pieza, de tal forma que se produzca una interacción entre ellas. El movimiento descrito puede conseguirse siguiendo distintos patrones de actuación:

- Aplicar movimiento a la herramienta y mantener inmóvil la pieza.
- Aplicar movimiento a la pieza y mantener inmóvil a la herramienta.
- Aplicar movimiento tanto a la pieza como a la herramienta.

Los movimientos descritos durante el desarrollo de un proceso de mecanizado pueden clasificarse en:

1. Movimiento de corte. Esta actividad origina un arranque de viruta durante una revolución (si el movimiento descrito es circular) o durante una carrera (si el movimiento descrito es rectilíneo). Durante este proceso no se describe ningún movimiento de avance.

2. Movimiento de avance. Permite el flujo continuo de viruta en un mecanizado cuando se combina con el movimiento de corte.
3. Movimiento de penetración. Es aquel que decide la profundidad del corte y, en consecuencia, que espesor de viruta se extraerá.
4. Movimiento de aproximación. Conjunto de operaciones de aproximación o de posicionamiento de herramienta previos al mecanizado. No interfiere en el mecanizado de una pieza.

### 1.3. Parámetros tecnológicos de corte<sup>1</sup>

Los parámetros tecnológicos se definen como variables que se deben ajustar en un proceso de mecanizado para que se realice de forma óptima. Estas magnitudes de cortes pueden clasificarse en:

#### 1.3.1. Velocidad de corte ( $V_c$ )

Es una velocidad lineal relativa que se origina entre la herramienta y la pieza en una dirección y sentido del movimiento descrito (movimiento de corte). La unidad de medida de esta velocidad es en  $m/min$ .

Se debe encontrar un equilibrio para que la velocidad de corte sea óptima, debido a que si es demasiado baja se pierde rendimiento, y si es demasiado alta la herramienta sufre una fatiga excesiva que desemboca en un desgaste prematuro.

Normalmente los fabricantes indican un rango de valores óptimo para el trabajo en función del material de la herramienta, material de la pieza, sección de viruta, refrigeración, tipo de construcción de máquina, etc.

En función de las variables descritas anteriormente se pueden calcular las revoluciones por minuto ( $rpm$ ) a las que debería girar la pieza o herramienta.

$$V_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \quad (1.1)$$

Donde:

$V_c$  = Velocidad de corte en  $m/min$

---

<sup>1</sup> Consultar ANEXO I para observar especificaciones técnicas sobre los parámetros tecnológicos de corte.

$d$  = Diámetro de la pieza o de la herramienta en  $mm$ .

$n$  = Revoluciones de la pieza o de la herramienta en un minuto ( $rpm$ )

### 1.3.2. Avance

El avance se define como el desplazamiento que sufre la herramienta en cada carrera o revolución. La unidad para expresar este recorrido suele ser en milímetros ( $mm$ ).

La velocidad de avance ( $V_a$ ) depende tanto de la velocidad de giro como del avance. Suele expresarse en unidades de ( $mm/min$ ).

$$V_a = a \cdot n \quad (1.2)$$

### 1.3.3. Profundidad de corte

La profundidad de corte se define como un valor de distancia en la que se mide la penetración que produce la herramienta en la pieza. La unidad de medida es en  $mm$ .

La sección de viruta ( $S$ ) puede calcularse a partir del avance ( $a$ ) y de la profundidad de corte ( $p$ ), se expresa en  $mm^2$ .

$$S = a \cdot p \quad (1.3)$$

### 1.3.4. Magnitudes de viruta

Este tipo de magnitudes derivan directamente de los parámetros tecnológicos de corte. En el corte de metales presenta una gran importancia la relación existente entre el espesor de viruta sin deformar y deformada.

- Magnitudes de viruta arrancadas. El producto del ancho ( $b$ ) por el espesor ( $h$ ) dan como resultado la sección transversal del arranque de viruta ( $S$ ).
- Magnitudes de viruta obtenida. El producto del ancho ( $b'$ ) y el espesor ( $h'$ ) da como resultado la sección transversal de viruta ( $S'$ ).

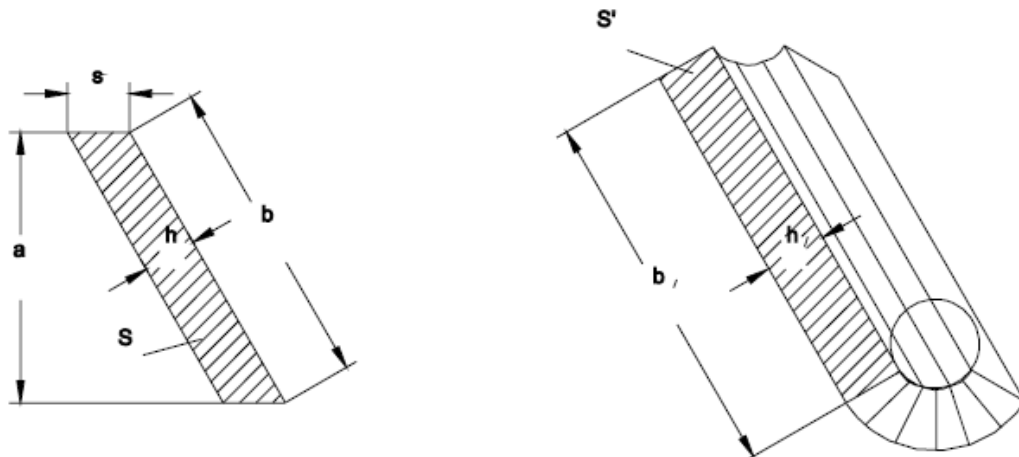


Figura 4: Magnitudes de viruta obtenida y arrancada

Donde:

s: Avance

$h'$ : Espesor de la viruta

a: Profundidad del corte

$b'$ : Ancho de la viruta

h: Espesor de la viruta por arranque

$S'$ : Sección transversal de la viruta

b: Ancho de la viruta por arranque

S: Sección transversal de la viruta por arranque

#### 1.4. Mecanizado con filos geoméricamente determinados

Existen varias técnicas de mecanizado en función del tipo de superficie que presente una pieza. Estas técnicas utilizan máquinas-herramientas específicas que mejoren la eficiencia y la calidad del mecanizado. Sin embargo, en ocasiones para una misma superficie pueden utilizarse distintos procedimientos y máquinas.

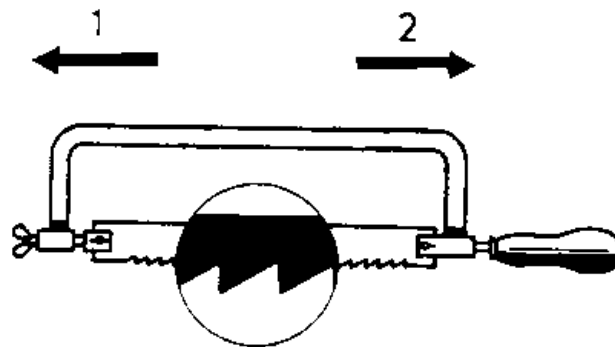
Los procesos de mecanizado más utilizados que presentan filos geoméricamente determinados son:

##### 1.4.1. Aserrado

Proceso que consiste en el corte de material por desprendimiento de viruta para conseguir unas dimensiones específicas en la pieza. El aserrado utiliza una herramienta



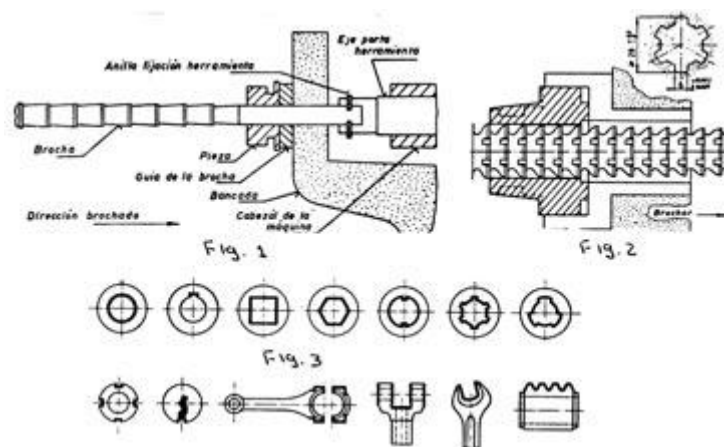
de múltiples filos denominada hoja de sierra. En el aserrado manual la hoja de sierra es sostenida por un arco de sierra.



*Figura 5: Aserrado manual*

#### 1.4.2. Brochado

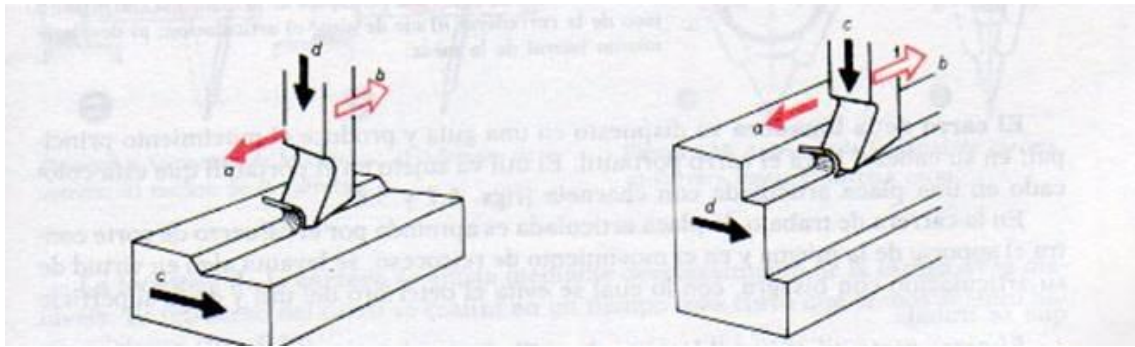
El brochado consiste en dar formas interiores a piezas que previamente han sido taladradas. Esto se consigue mediante el uso de una herramienta rectilínea que presenta múltiples filos para conseguir formas complejas.



*Figura 6: Formas comunes de brochado*

#### 1.4.3. Cepillado

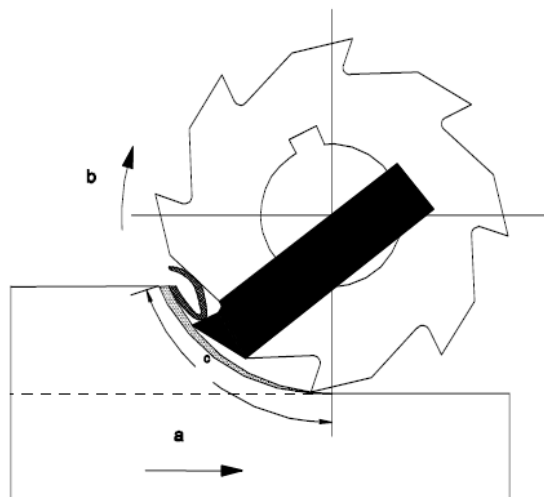
El cepillado es un proceso de mecanizado que consiste en arrancar virutas en forma de tiras con el uso de una herramienta que presenta un solo filo y que se mueve de forma horizontal.



*Figura 7: Formas comunes de brochado*

#### 1.4.4. Fresado

Para realizar un fresado se utiliza una herramienta que presenta múltiples filos y que gira a unas revoluciones determinadas. Al producirse el contacto herramienta-pieza se origina un desprendimiento de material. Puede conseguir superficies planas, curvas, entalladuras, etc.



*Figura 8: Imagen que muestra el avance de la herramienta en un proceso de mecanizado por fresado*

Las variables del proceso se definen como:

a: Movimiento de avance

b: Movimiento principal

c: Trayectoria de trabajo de un diente de la herramienta de fresado

#### 1.4.5. Mandrinado

Proceso que consiste en realizar taladros de precisión mediante el uso de una máquina destinada únicamente para ello, llamada mandrinadora. Los taladros realizados suelen hacerse en una disposición espacial horizontal.

#### 1.4.6. Mortajado

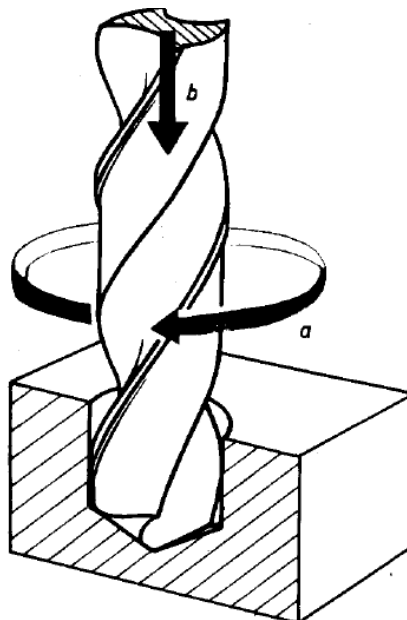
El proceso de mortajado es similar al cepillado, sin embargo, el movimiento que realiza el útil en este caso es únicamente en el eje vertical.

#### 1.4.7. Punteado

El punteado consiste en realizar taladros de precisión en una disposición espacial vertical a partir de una máquina diseñada para ello, denominada punteadora.

#### 1.4.8. Taladrado

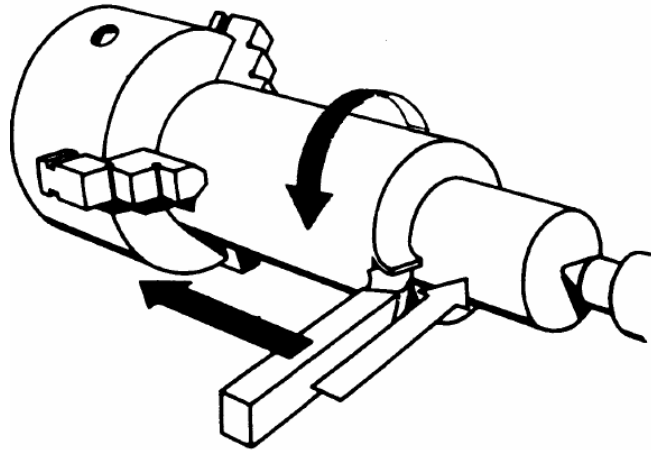
Consiste en realizar agujeros en piezas mediante el uso de un útil denominado broca. La broca presenta unas revoluciones determinadas y al ejercer presión sobre un objeto origina un agujero.



*Figura 9: Representación gráfica de un proceso de taladrado*

#### 1.4.9. Torneado

El torneado es un proceso de mecanizado para elaborar piezas por revolución. La pieza gira a unas revoluciones determinadas y la herramienta de corte obtiene los diseños que se requieran.



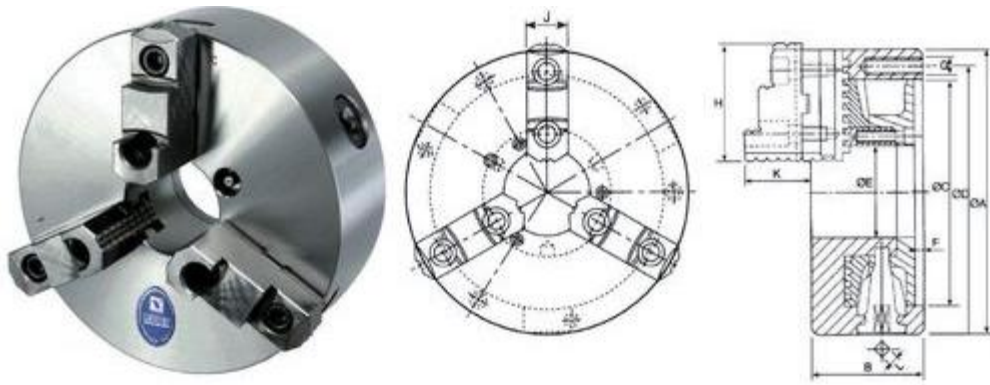
*Figura 10: Representación de un proceso de mecanizado denominado torneado*

### 1.5. Sistemas de sujeción de piezas en un torno

Los elementos de sujeción en un torno permiten amarrar y transmitir un movimiento giratorio de corte a la pieza que se desea mecanizar. Para adaptarse a la configuración que ofrece cada pieza existen diferentes opciones de sujeción.

#### 1.5.1. Platos centradores de garras

Para el amarre adecuado de piezas de corta longitud se suelen emplear los platos centradores con dos, tres o incluso cuatro garras. Este plato de garras está unido al husillo principal mediante una operación de roscado. El uso de este sistema de sujeción sirve para ejecutar torneados exteriores e interiores.



*Figura 11: Plato de garras*

El mecanismo de accionamiento que permite la apertura y cierre del plato puede estar integrado por:

- Sistema de accionamiento mecánico, que emplea cremalleras cuneiformes o roscas planas para su funcionamiento.
- Sistema de accionamiento neumático o hidráulico.

Presentan problemas de centrado adecuado y de la necesidad de incorporar un material blando entre el contacto garra-pieza.

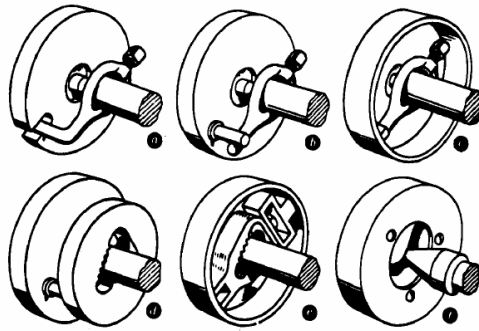
#### 1.5.2. Montaje entre puntos

Este tipo de sistema de amarre se emplea para el mecanizado por torneado de piezas relativamente largas que requieren operaciones exteriores.

La guía para un buen mecanizado se basa en colocar la pieza adecuadamente entre el punto del husillo y el contrapunto del cabezal móvil. Estos dos mecanismos deben estar perfectamente alineados.

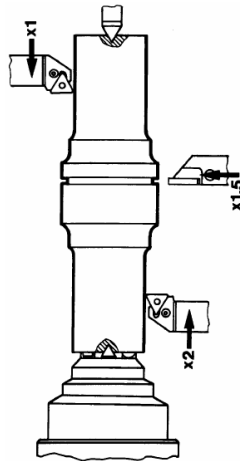
Los métodos de montajes entre puntos más empleados en la industria son:

- Montaje entre punto con platos y perros de arrastre.



*Figura 12: Montaje entre punto con platos y perros de arrastre*

- Montaje entre punto con arrastradores frontales.



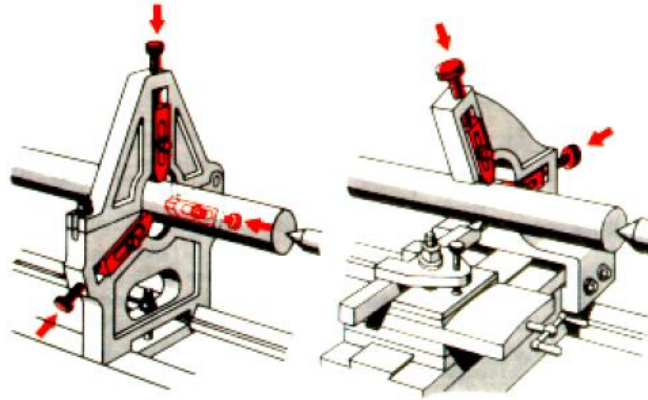
*Figura 13: Montaje entre punto con arrastradores frontales*

### 1.5.3. Lunetas

Las lunetas se utilizan para trabajar barras de gran longitud en relación a su tamaño de diámetro. Este método evita el efecto de flexiones residuales debido al peso o a la fuerza derivada del proceso de corte.

Las lunetas son dispositivos mecánicos que sirven de apoyo a la pieza y reducen el desplazamiento por flexión.

- Luneta fija. Se instala sobre la bancada del torno, en las guías, y sostiene la pieza.
- Luneta móvil. Se instala sobre el carro principal y acompaña a la herramienta en su movimiento. Reduce esfuerzos cortantes.

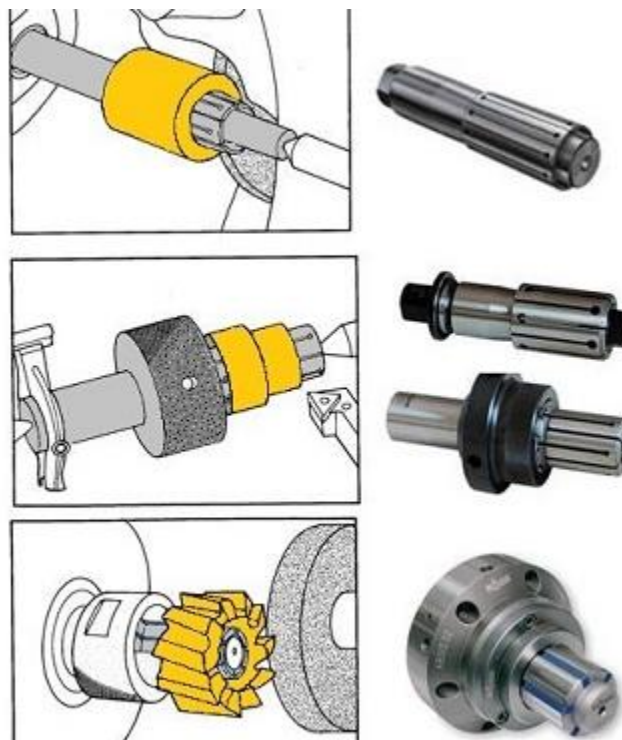


*Figura 14: Luneta fija y luneta móvil*

#### 1.5.4. Pinzas o boquillas expansibles

Los dispositivos mecánicos denominados pinzas o boquillas expansibles son casquillos rasgados longitudinalmente en parte. Presentan una forma exterior algo cónica y un diámetro interior mayor que el diámetro exterior de la pieza que se desea mecanizar.

El método de funcionamiento de este dispositivo consiste en introducir la pieza que se desea mecanizar en el interior de la pinza. Tras esto, se comprime la pinza al apretar una tuerca y la pieza queda completamente fija.



*Figura 15: Mandriles expansibles de pinza*

El inconveniente que presenta este modelo es la necesidad de buscar una pinza para cada pieza que se necesita mecanizar.

#### 1.5.5. Platos planos con útiles especiales

Los platos planos con útiles especiales se emplean para la sujeción de piezas irregulares, como por ejemplo piezas que han sido fundidas o estampadas.

Este tipo de plato cuenta con una serie de taladros para permitir la fijación de la pieza o del útil especial de amarre.

Para el montaje se pueden usar varios dispositivos como: tornillos, escuadras o sistemas de sujeción con accionamientos neumáticos o hidráulicos. Para un correcto mecanizado siempre es condición necesaria realizar un buen equilibrado.



## **2. Impresión 3D**

La impresión 3D se define como un método de fabricación por adición de un material en forma de capas para la elaboración de un prototipado realizado en ordenador. La ventaja principal que presenta esta técnica es la reproducción de geometrías muy complejas de forma bastante rápida.

Las tecnologías de impresión en 3D se pueden clasificar en:

### **2.1. Tecnologías de deposición de material**

Modelado de deposición fundida (FDM, *Fusion Deposition Modeling* o FFF, *Fused Filament Fabrication*). Es un tipo de tecnología que se comercializó por primera vez a través de la empresa Stratasys y que utiliza plásticos como el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS por sus siglas en inglés) o el ácido poliláctico (PLA por sus siglas en inglés) para conseguir modelar piezas. Su bajo coste y su rapidez para confeccionar prototipados tridimensionales permiten que sea unas de las técnicas más utilizadas.

El FDM aplica una capa en la superficie de la base para separar la pieza de la base. A continuación, un hilo de plástico se hace pasar por un extrusor. Este extrusor es un tubo que presenta una gran temperatura y que origina que el plástico llegue hasta el punto de fusión. El plástico es depositado en un lugar determinado de la capa de la base por medio del extrusor. Tras ser depositado el material se enfría y endurece. Una vez terminada la capa comienza otra superior.

Este tipo de modelado necesita a veces soportes estructurales para realizar formas suspendidas en el espacio.

### **2.2. Tecnología láser**

En primer lugar, la estereolitografía (SLA por sus siglas en inglés). Este tipo de tecnología es anterior a la FDM y a la FFF. La pieza se modela gracias a la curación (solidificación) de la resina líquida a partir de la luz ultravioleta. Las piezas presentan una gran precisión, aunque se desperdicia mucho material, son piezas translúcidas y algunas requieren estructuras complementarias o soportes.

Sobre la sinterización selectiva por láser (SLS por sus siglas en inglés) cabe señalar que nació sobre el año 1980 y consiste en fundir y sintetizar materiales en polvo de forma muy selectiva a partir de un rayo láser. Esta técnica presenta varias ventajas entre las que se destacan una gran velocidad de modelado, bajo coste, puede emplear diversos materiales y precisión. Sin embargo, es un proceso delicado y complejo y aunque presenta buena precisión, esta es peor que la estereolitografía. También hay que añadir que las piezas son porosas.

En cuanto a la fusión selectiva por láser (SLM, Selective Laser Melting). La SLM es bastante similar a la SLS, es decir, permite una sinterización selectiva por láser, sin embargo, esta técnica derrite el material y no lo funde a baja temperatura. Es posible emplear una gran variedad de materiales.

Algunas de las ventajas que presenta el proceso de SLM son la producción eficiente debido a que permite el consumo moderado de material y una alta biocompatibilidad en aleaciones. Además, las propiedades de los prototipos son similares a la de piezas coladas.

Finalmente, la deposición por láser (LDT, Laser Deposition Technology). La deposición por láser LDT comienza en el año 1971 y hasta el año 1981 no es industrializada por Rolls-Royce.

Actualmente este método es utilizado para técnicas de fabricación rápida o para la fabricación por capas, debido a que los modelos generados no presentan pasos intermedios ni postratamientos.

El LDT permite aportar una capa de material a cada sustrato para conseguir propiedades superficiales duras y resistentes al desgaste y la corrosión en zonas concretas, sin perder las propiedades de ductilidad en la mayor parte de la pieza.

### **2.3. Otro tipo de tecnologías**

En este caso, se destacarán la extrusión por jeringuilla (Syringe Extrusion) y la fabricación por corte y laminado (LOM, Laminated Object Manufacturing).

La extrusión por jeringuilla se basa en extruir cualquier tipo de material viscoso por un extrusor. Este material puede ser o no calentado. En cambio, la fabricación por corte y

laminado consiste en superponer capas de material, unas encima de otras, unidas con resina o pegamento y cortadas con una forma determinada mediante el uso de láser.

## **2.4. La impresora 3D**

Uno de los objetivos propuestos para este proyecto es la fabricación de un prototipo de un mandrino expansible para un torno mediante el uso de impresión en 3D, en concreto, mediante el uso de una impresora 3D. Una vez descrito los distintos métodos de impresión en 3D se procede a describir que es una impresora 3D y que métodos de impresión utiliza.

Una impresora 3D es un dispositivo que permite modelar piezas tridimensionales a partir de un diseño asistido por ordenador (CAD). Este tipo de dispositivos pueden utilizar métodos de impresión como el modelado de deposición fundida, la estereolitografía, la sinterización selectiva por láser o la fabricación por corte y laminado, todas ellas anteriormente descritas.

El método elegido para la fabricación de esta pieza será el modelado por deposición fundida (FDM o FFF). La impresora elegida para la fabricación será una “Prusa i3 Hephestos”<sup>2</sup>.

Para obtener una pieza por impresión en 3D se deben seguir una serie de pautas. En primer lugar, debe realizarse un modelado de una pieza en CAD (diseño asistido por computadora) mediante el uso de un programa informático de modelado tridimensional. Algún ejemplo de estos programas son el CATIA, SolidWorks o Solid Edge entre otros.

Una vez que se ha generado un modelo tridimensional se debe modificar y cambiar el archivo a un tipo de fichero “.stl”. Este tipo de fichero es un archivo informático de CAD que excluye tanto las texturas, colores o propiedades física que presenta el modelo y únicamente obtiene información de sus condiciones geométricas. Este tipo de fichero es un formato estándar para aquellas tecnologías que utilizan la fabricación por deposición fundida (FDM o FFF).

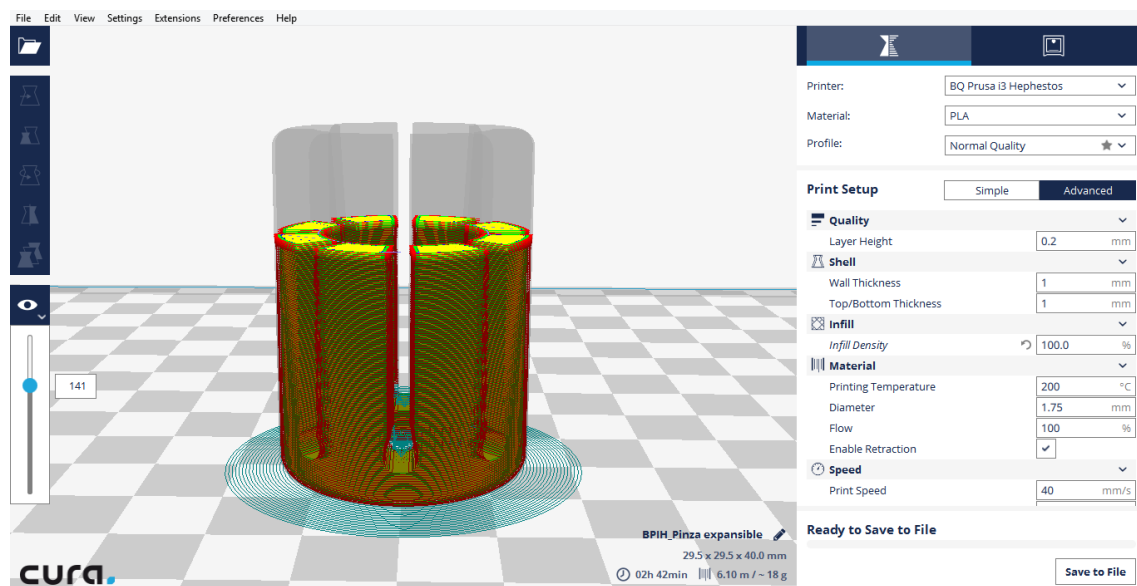
El modelo STL debe ser convertido a un fichero G-Code<sup>3</sup> que indica las instrucciones que debe seguir la impresora para la fabricación de la pieza. Este tipo de fichero cuenta

---

<sup>2</sup> Consultar ANEXO II para examinar la ficha técnica de la impresora 3D Prusa i3 Hephestos.

con un lenguaje de programación por control numérico (CNC). El prototipo es seccionado en capas o láminas horizontales, de esta forma se construyen trayectorias que rellenan cada capa y estudian la cantidad de material que debe ser extruida. Este tipo de fichero controla variables como la velocidad de extrusión, la temperatura, la velocidad de movimientos, etc.

Mediante el uso de un software para la impresión de piezas 3D, que permite optimizar el aspecto y la calidad de la pieza, se configura la impresión. Este software genera un fichero G-Code a nuestro gusto y también permite una previsualización geométrica de la pieza donde se muestran varias funciones de interés. En este caso se ha utilizado un software diseñado por la empresa Ultimaker llamado CURA.



*Figura 16: Ilustración del software Cura empleado para la impresión de las piezas del prototipado del mandrino para sujeción de piezas por expansión*

<sup>3</sup> Consultar ANEXO III para ver más información sobre las funciones del lenguaje de programación en CNC.

### 3. Método de Elementos finitos

#### 3.1. Introducción al Método de Elementos Finitos

El Método de Elementos Finitos, también conocido con la abreviatura MEF, presenta una gran importancia en la resolución de cálculos matemáticos aplicados principalmente a la ingeniería. Este método de cálculo permite resolver problemas de forma muy eficaz si se compara con los procedimientos tradicionales de cálculo, donde en muchos casos era impensable llegar a soluciones reales. La ausencia de este método de cálculo obligaba a los analistas a realizar continuos ensayos para estudiar el comportamiento de los prototipos, esto ocasionaba una gran pérdida económica y de tiempo.

El método de cálculo por elementos finitos proporciona una solución del sistema estudiado más realista y sencilla, a la par que permite una devaluación económica en investigación. Sin embargo, no se debe olvidar que se trata de un estudio que se basa en aproximaciones, debido a la hipótesis básica que forman el MEF. Por este motivo, la fabricación de prototipado de piezas será muy reducida puesto que el cálculo teórico se aproxima en gran medida a las condiciones reales.

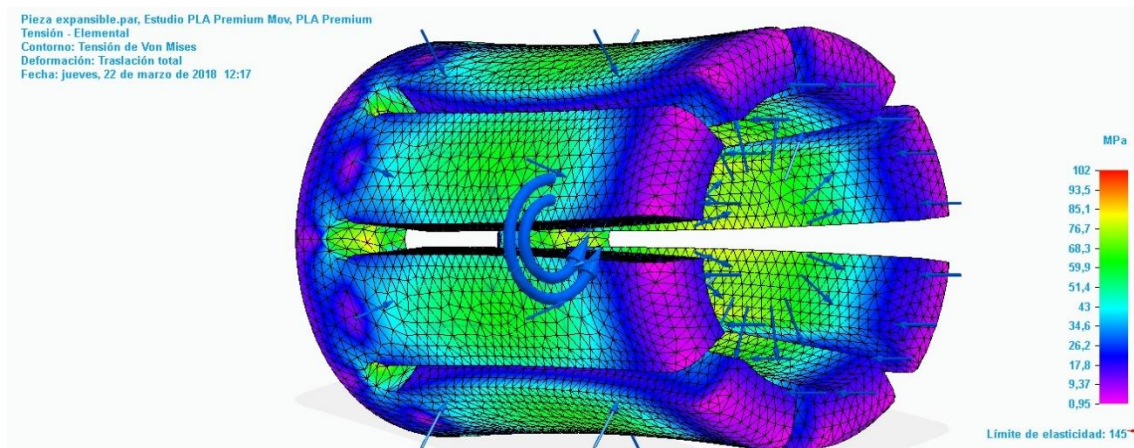


Figura 17: Representación gráfica del cálculo de reacciones en una pieza por el MEF

El uso del MEF es relativamente reciente, aunque las bases matemáticas que lo integran presentan bastante tiempo. El motivo por el que este descubrimiento es actual se debe principalmente al desarrollo de las nuevas tecnologías computacionales. La elaboración de nuevos programas informáticos ha posibilitado este tipo de cálculos.

### 3.2. Historia del Método de Elementos Finitos

El empleo de sistemas de discretización temporal y espacial y el uso de métodos de aproximación para hallar resultados de problemas ingenieriles o físicos es conocido desde hace bastante tiempo.

El marco temporal donde se puede encuadrar el descubrimiento y el uso de estos métodos matemáticos se remonta a la construcción de las pirámides egipcias. Los egipcios hacían uso de modelos matemáticos de discretización para calcular el volumen de sus pirámides. Arquímedes, físico, inventor, astrónomo y matemático griego, (287-212 a.C.) utilizó este método para hallar volúmenes de sólidos o para el cálculo de áreas. Igualmente, en Oriente, el matemático chino Lui Hui (300 d.C.) elaboró un polígono regular que presentaba un total de 3072 lados, que le permitió una aproximación bastante precisa del número Pi.

El sistema de elementos finitos contemporáneo se utilizó por primera vez sobre el año 1940. Estaba relacionado con la especialidad aeroespacial y fue utilizado por el matemático alemán Courant para el análisis de funciones polinómicas para la formulación de ejercicios elásticos en contornos triangulares. Este desarrollo partía con la premisa de ser un método variacional de Rayleigh-Ritz para la aproximación de funciones.

El MEF actual es descrito en el estudio de estructuras aeronáuticas por Clough, Topp, Turner y Martin, donde se emplean funciones de forma y discretización.

Posteriormente a estos sucesos se publican varios libros y trabajos donde se indaga tanto en las contribuciones matemáticas como en sus aplicaciones para el análisis de estructuras<sup>4</sup>. Estas obras motivaron el interés de matemáticos para el estudio de ecuaciones diferenciales lineales y no lineales. La repercusión directa se encuentra en el gran número de estudios que surgieron después de estas publicaciones sobre el MEF. En consecuencia, se ha logrado que este método sea uno de los modelos de análisis más efectivos para la resolución de ejercicios de ingeniería y para la ciencia aplicada.

---

<sup>4</sup> Las publicaciones más destacables son el trabajo de R. Courant "Some aspects of recent contributions to the mathematical theory of finite elements", donde se realizan importantes aportaciones matemáticas, o los libros de Przemieniecki, "Theory of Matrix Structural Analysis", y Holister, "Stress Analysis" para el análisis estructural. También destaca la obra de Zienkiewicz y Cheung, "The Finite Element Method in Structural and Continuum Mechanics", y la de Zienkiewicz y Taylor, "El método de los Elementos Finitos", por su gran interpretación del MEF.

Hogaño, este método se encuentra en pleno auge. Se ha consolidado en la industria y se utilizado también en el campo de la investigación. El empleo de medios informáticos ha posibilitado su desarrollo, donde se ha adaptado el avance matemático al ámbito informático. Un ejemplo de este avance es la incorporación de paquetes gráficos para visualizar el modelado y el balance de resultados.

### 3.3. Conceptos generales del método

El método de elementos finitos permite calcular campos de desplazamientos, tensiones y deformaciones de un dominio  $V$ , previamente dividido en varios subdominios  $V$ , mediante el empleo de funciones de aproximación local independientes en cada subdominio, y establece una condición de continuidad entre las funciones de aproximación de los subdominios adyacentes.

Este método divide un conjunto en pequeños elementos interconectados por una serie de puntos denominados nodos. Las fórmulas que describen el comportamiento del conjunto también son válidas para cada elemento. El objetivo principal de este método es reducir un número muy elevado de grados de libertad que presenta un conjunto a un sistema reducido de grados de libertad. En este sistema reducido se podrán aplicar sistemas de ecuaciones lineales o no lineales.

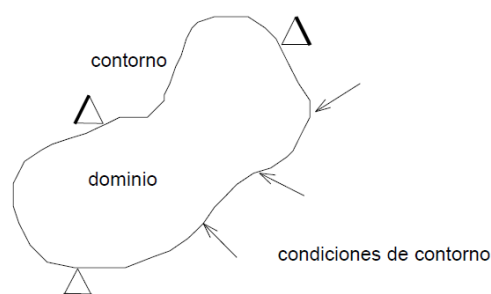


Figura 18: Dominio "V"

Para la resolución de un problema el MEF divide un dominio  $V$  mediante el uso de punto (sistema lineal), líneas (sistema bidimensional) o en superficies (sistema tridimensional) imaginarias para conseguir una serie de subdominio  $V$  (elementos). Las ecuaciones fundamentales del método se plantean sobre los nodos, que conectan los distintos elementos que integran el dominio  $V$ , y permiten establecer determinadas incógnitas, en el caso estructural establecen incógnitas relacionadas con los

desplazamientos. Estas incógnitas son designadas por el nombre de grados de libertad de cada nodo y se clasifican en:

- Desplazamiento en la dirección del eje “x” o “y”
- Giros según el eje “z”
- Temperatura

### 3.4. Principios generales para un continuo elástico

En el siguiente apartado se realiza una selección de la formulación matemática del MEF para el estudio estructural.

#### 3.4.1. Principio de los Trabajos Virtuales

Debido a la imposibilidad de encontrar una resolución concreta para medios continuos que presentan ecuaciones diferenciales y condiciones de contorno sobre funciones, es necesario el empleo del Principio de los Trabajos Virtuales (PTV).

Este principio puede simplificarse en:

Para unas deformaciones:

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz}, \gamma_{xx}, \gamma_{xy}, \gamma_{zx}\}^T \quad (3.1)$$

Unas tensiones:

$$\{\sigma\} = \{\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{zx}\}^T \quad (3.2)$$

Una ecuación para un elemento diferencial de volumen en equilibrio es:

$$\nabla\{\sigma\} + \{X\} = 0 \quad (3.3)$$

$$\int_v \{\delta\varepsilon\}^T [C] \{\varepsilon\} dv = \int_v \{\delta u\}^T (\{X\} - \rho\{ii\}) dv + \int_s \{\delta u\}^T \{t\} ds \quad (3.4)$$

#### 3.4.2. Función interpolación

Conjunto de funciones que construyan un campo de desplazamientos dentro del elemento en el que se integren sus desplazamientos nodales.



$$[M]\{\ddot{U}\} + [K]\{U\} = \{P\} \quad (3.5)$$

Donde se define cada variable como:

Matriz de masa consistente:

$$[M] = \int_v [N]^T \rho [N] dv \quad (3.6)$$

Matriz de rigidez:

$$[K] = \int_v [B]^T [C][B] dv \quad (3.7)$$

Matriz de cargas nodales:

$$\{P\} = \int_v [N]^T \{X\} dv + \int_v [N]^T \{t\} dv \quad (3.8)$$

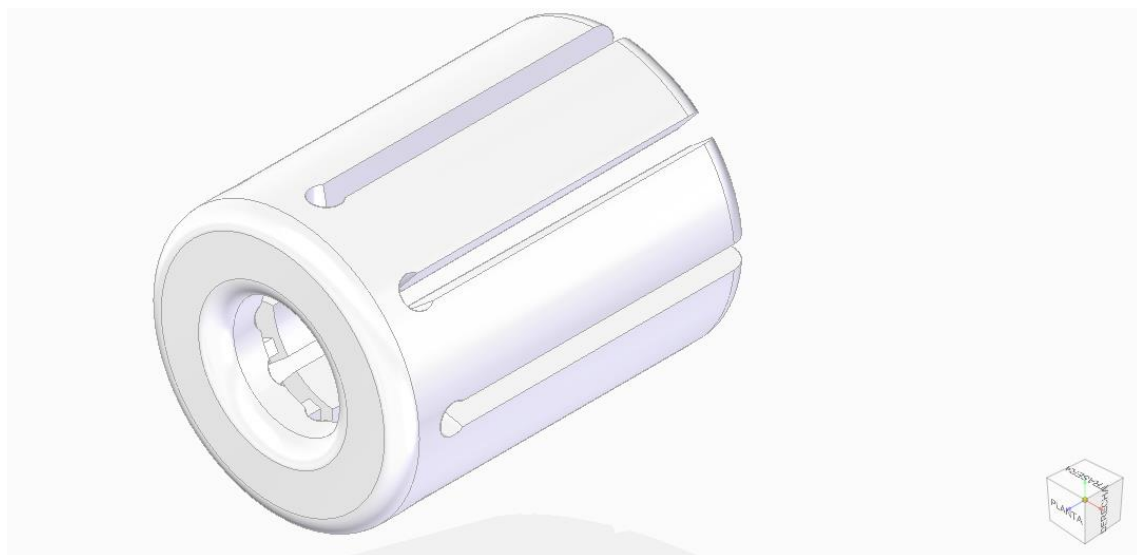
## 4. Planteamiento del problema y metodología

### 4.1. Planteamiento del problema

Para realizar un desarrollo adecuado de diseño, análisis y prototipado de un mandril de sujeción de piezas por expansión se realizará un estudio que se resume en los siguientes conceptos.

En primer lugar, se ha seleccionado la pieza más crítica de sistema de sujeción para estudiarla en profundidad. Esta pieza hace referencia a la pinza expansible que se ha diseñado mediante el Diseño Asistido por Computadora (CAD).

En la siguiente ilustración se muestra el modelo, sin embargo, el estudio detallado del diseño se detallará exhaustivamente más adelante.



*Figura 19: Pinza de sujeción por deformación elástica*

Para realizar un estudio de esfuerzos es necesario hallar el giro óptimo que debe presentar la pinza con carácter previo. Por este motivo, uno de los estudios iniciales es calcular mediante un procedimiento analítico el giro óptimo de la pieza para los materiales de fabricación empleados.

El siguiente objetivo será realizar describir detalladamente como actúan las fuerzas en la pinza expansible cuando recorre una trayectoria cónica. Como el objetivo del proyecto es comparar un material de fabricación normalizado con un compuesto plástico, este estudio de fuerzas estará dividido en cuatro apartados. En esta sección se describe y

calculan las fuerzas que intervienen en las interacciones de contacto entre los distintos materiales.

Una vez obtenidos los resultados analíticos se procede al estudio mediante el Método de Elementos Finitos que proporcionar el software de trabajo ANSYS Workbench y Solid Edge ST9.

Mediante la simulación de la pinza expansible se comprobará el comportamiento que presenta ante esfuerzos en estado estático y ante esfuerzos con interacciones de contacto en un proceso no lineal. Este estudio permite comprobar si el modelo, fabricado en distintos compuestos, soporta los esfuerzos calculados anteriormente.

Finalmente, se realiza una descripción detallada del modelo seleccionado y el motivo del diseño, debido a que no es únicamente un estudio de diseño. En este apartado el prototipado de fabricación está muy relacionado con el diseño final.

#### **4.2. Metodología**

Durante el desarrollo del trabajo se emplearán fundamentalmente dos programas: el Solid Edge ST9 y el ANSYS Workbench V16.

Mediante el uso del programa de diseño Solid Edge ST9 se realiza un modelo tridimensional de todos los componentes que integran el mandril de sujeción de piezas. Asimismo, se utiliza para realizar el estudio esfuerzos en estado estático.

El proceso de creación comienza en el apartado de simulación, donde se genera un nuevo estudio elástico lineal con un tipo de mallado tetraédrico. Seguidamente, se define la pieza objeto de estudio y se aplican los esfuerzos. Tras seleccionar un tamaño de mallado próximo a 0.5mm, se compila el programa y se obtienen los valores de tensiones, deformaciones, energías, etc.

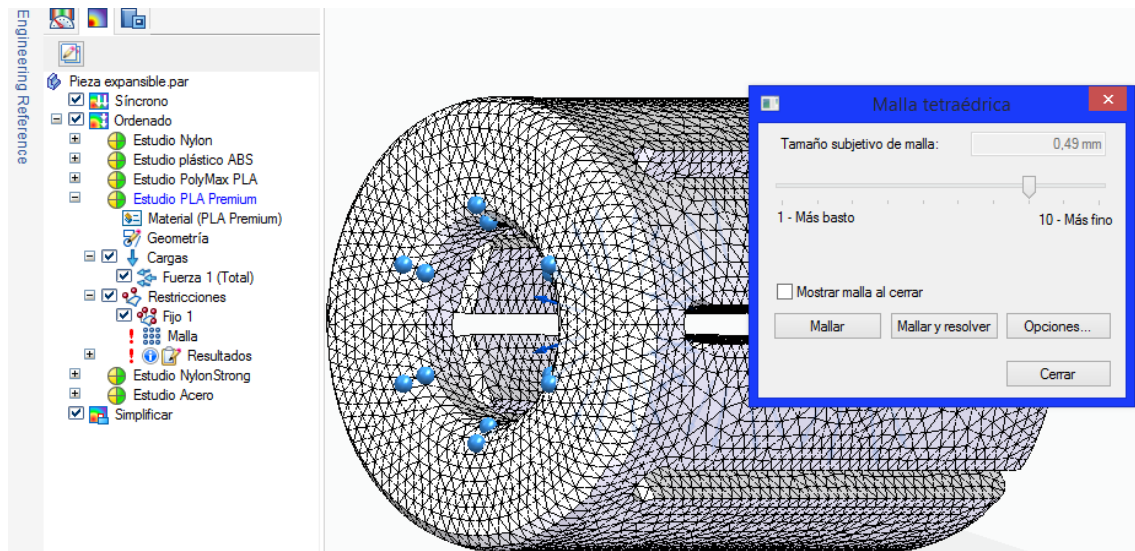


Figura 20: Análisis MEF Solid Edge ST9

Gracias al ANSYS Workbench V16 se realiza el estudio de esfuerzos para un contacto no lineal.

En primer lugar, se ejecuta un estudio entre el contacto de la pinza expansible y el cono, por lo que se importan las geometrías del programa anterior. Los siguientes pasos consisten en definir el material, establecer el área de contacto, asignar tipo de contacto, en este caso por fricción, para un estudio simétrico, un tipo de formulación mediante Lagrange y un método de detección mediante Gauss, entre otras.

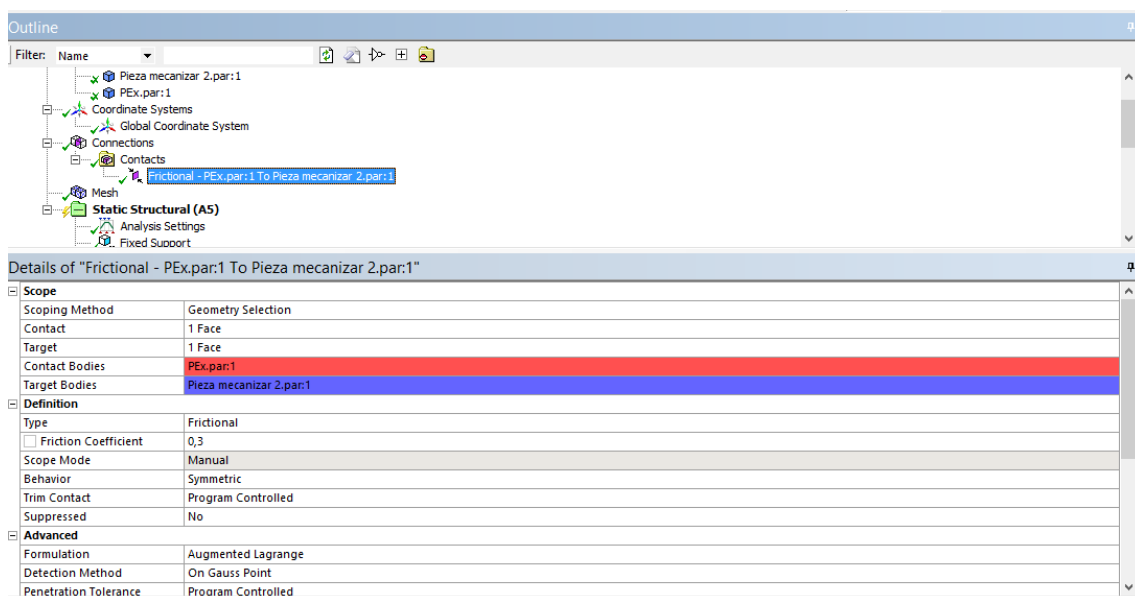


Figura 21: Descripción procesos ANSYS Workbench V16

A continuación, se procede a generar un mallado automático del material, debido a que esta versión estudiante impide seleccionar el tipo de mallado que se desee.

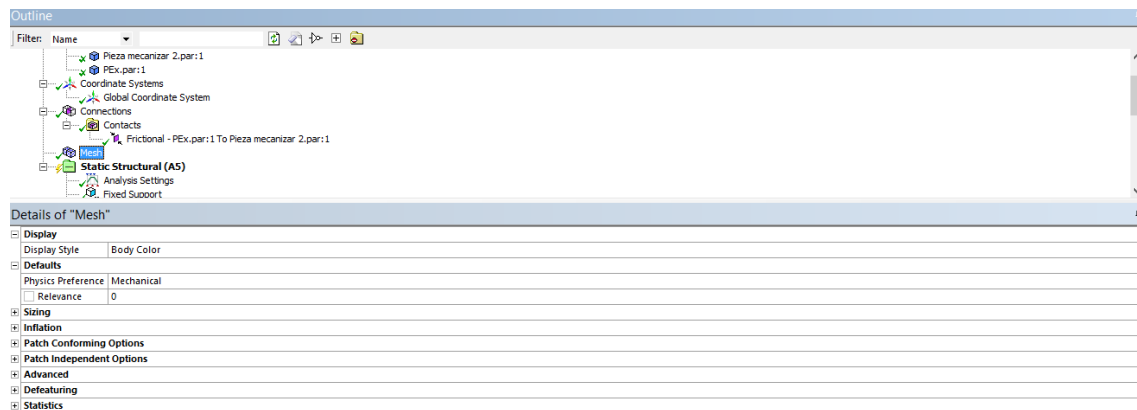


Figura 22: Mallado ANSYS Workbench V16

Por último, se aplican las condiciones de contornos y las cargas y se analizan los requisitos mecánicos que proporciona el sistema de sujeción.

El siguiente objetivo es realizar el mismo análisis, pero en este caso se estudia el contacto entre la pinza y la pieza que se desea trabajar. Por lo que se lleva a cabo un contacto mediante fricción similar al anterior en cuanto a requisitos analíticos.

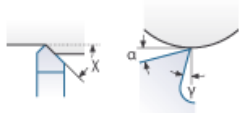
## **5. Estudio del giro en la pinza expansible**

El modelo de diseño de pinza expansible de sujeción de piezas está destinado para procesos de torneados, donde se encuentran las operaciones de refrentado, cilindrado, mandrinado, torneado cónico, torneado excéntrico, copiado, roscado, ranurado, tronchado, moleteado, taladrado y escariado. Para realizar estas operaciones, en primer lugar, debe estipularse unas revoluciones genéricas para los procesos de torneado. El cálculo de revoluciones depende de variables que están relacionadas con el material seleccionado y con las dimensiones del torneado.

Para la selección del material de la pieza a mecanizar se comparará un material de origen plástico, denominado ácido poliláctico (PLA), con un aluminio no aleado.

Para el mecanizado del ácido poliláctico, cabe destacar que no se han realizado muchos análisis de mecanizado con este compuesto plástico. Sin embargo, este material presenta rasgos mecánicos similares al polietileno (PE). Estas propiedades similares son la fuerza extensible o el módulo de elasticidad. El motivo de la elección de este compuesto plástico se debe a que será el material con el que se realizará la impresión en 3D.

En la siguiente tabla se realiza un resumen de las principales características de corte con herramienta en un torneado de materiales plásticos. En esta tabla, aunque no se encuentra el PLA, aparece el PE. Por este motivo asumimos que se trabaja con compuesto plástico PE por la proximidad entre sus propiedades mecánicas.

Turning					
		α Clearance angle (°) γ Rake angle (°) χ Side angle (°) V Cutting speed (m/min) S Feed (mm/rpm)			
		The nose radius r must be at least 0.5 mm			
	α	γ	χ	V	S
<b>TECAFINE PE, PP, PMP</b>	6-10	0-5	45-60	250-500	0,1-0,5
TECARAN ABS	5-15	25-30	15	200-500	0,2-0,5
TECANYL	5-10	6-8	45-60	300	0,1-0,5 ●
TECAFORM AH, AD	6-8	0-5	45-60	300-600	0,1-0,4
TECAMID/TECARIM/TECAST	6-10	0-5	45-60	250-500	0,1-0,5
TECAMID TR	5-10	6-8	45-60	300	0,1-0,5 ●
TECADUR PBT/TECAPET	5-10	0-5	45-60	300-400	0,2-0,4
TECANAT	5-10	6-8	45-60	300	0,1-0,5 ●
TECAFLON ETFE, PVDF, PTFE	10	5-8	10	150-500	0,1-0,3
TECAPEI	6	0	45-60	350-400	0,1-0,3 ●
TECASON S, P, E	6	0	45-60	350-400	0,1-0,3 ●
TECATRON	6-8	0-5	45-60	250-500	0,1-0,5
TECAPEEK	6-8	0-5	45-60	250-500	0,1-0,5
TECASINT, TECATOR	2-5	0-5	7-10	100-120	0,05-0,08 ●
Reinforced/filled TECA products*	6-8	2-8	45-60	150-200	0,1-0,5 ●

\* Reinforcing agents/fillers:  
Glass fibres, glass beads, carbon fibres, graphite, mica, talcum, etc.

● Preheat material to 120 °C  
● Caution when using coolants: susceptible to stress cracking  
● Use carbide-tipped tools

Tabla 1: Características de corte con herramienta en un torneado de compuestos plásticos

El régimen de giro de la pieza se calcula a partir de la siguiente fórmula para un torneado:

$$n = \frac{1000 \times V_c}{\pi \times D} \quad (5.1)$$

Donde:

$V_c$  = Velocidad de corte en unidades de  $m/min$

$D$  = Diámetro exterior del torneado, medido en unidades de  $mm$

Para estimar las  $rpm$  máximas a las que gira la pieza debe estudiarse detalladamente como influye las variables  $V_c$  y  $D$ .

La velocidad de corte, como se observa en la tabla X, puede situarse entre un rango de 250-500  $m/min$ . Por este motivo, como las revoluciones son directamente proporcionales a esta variable, se escogerá el rango mayor de la velocidad de corte, es decir:

$$V_c = 250 \text{ m}/\text{min}$$

Para estimar la variable dimensional correspondiente al diámetro de mecanizado, se considerará el menor diámetro de mecanizado posible, debido a que las revoluciones son inversamente proporcionales a esta variable, en consecuencia, cuanto menor sea el tamaño del diámetro, mayor serán las *rpm*.

$$D \approx 11 \text{ mm}$$

Finalmente se resuelve la fórmula correspondiente y se obtiene el valor de las revoluciones máximas:

$$n_{\text{máx}} = \frac{1000 \times V_c}{\pi \times D} \approx 7500 \text{ rpm} \quad (5.2)$$

Estas revoluciones se tendrán en cuenta para el desarrollo teórico de cálculos posteriores.

Las propiedades de corte de interés para el mecanizado de una pieza de acero se muestran en la siguiente tabla.



P Aceros	Operación	a <sub>p</sub> Profundidad de corte mm	f Avance mm/rev	Geometrías negativas									
				Designación de velocidad de corte / rompevirutas									
				Mecanizado de aceros con bajo contenido en metal duro		Aceros con contenido medio en carbono y aceros con contenido alto en carbono		Aceros de aleación y aceros de herramientas fáciles de mecanizar		Aceros de herramientas y aceros de moldes			
				v <sub>c</sub> m/min	Geo. 1° 2°	v <sub>c</sub> m/min	Geo. 1° 2°	v <sub>c</sub> m/min	Geo. 1° 2°	v <sub>c</sub> m/min	Geo. 1° 2°	v <sub>c</sub> m/min	Geo. 1° 2°
Recubiertos de MTCVD	1505	D	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		S	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		A	0.5-1.0	0.1-0.2	610	M5	488	M5	366	M5	183	M5	
	1510	D	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		S	1.0-3.2	0.15-0.25	457	R3 M5	366	R3 M5	305	R3	152	R3	
		A	0.5-1.0	0.1-0.2	518	M5 F5	396	M5 F5	305	M5 F5	160	M8	
	5615	D	2.0-7.6	0.25-0.64	288	R3 R6	247	R3 M8	205	R3 M8	165	R3 M8	
		S	1.0-3.8	0.2-0.4	535	M5 M8	412	M5 M8	370	M5 M8	205	M5 M8	
		A	0.5-1.3	0.1-0.2	617	F2 F4	494	F2 F4	412	F2 F4	227	M5 M3	
	5625	D	2.0-7.6	0.25-0.64	229	R3 R6	190	R3 M8	153	R3 M8	95	R3 M8	
		S	1.0-3.8	0.2-0.4	419	M5 M8	305	M5 M8	266	M8 M5	114	M5 M8	
		A	0.5-1.3	0.1-0.2	458	F2 F4	380	F2 F4	305	F2 F4	135	M5 M3	
	5635	D	2.0-7.6	0.25-0.64	167	R3 M8	134	R3 M8	100	R3 M8	60	M8 M5	
		S	1.0-3.8	0.2-0.4	268	R3 M8	201	R3 M8	167	R3 M8	70	M8 M5	
		A	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	8515	D	2.0-7.6	0.25-0.64	183	R3 M8	152	R3 M8	-	-	-	-	
		S	1.0-3.8	0.2-0.4	305	M8 M5	244	M8 M5	-	-	-	-	
		A	0.5-1.3	0.1-0.2	396	F5	305	F5	-	-	-	-	
	8525	D	2.0-7.6	0.25-0.64	137	R3 M8	107	R3 M8	-	-	-	-	
		S	1.0-3.8	0.2-0.4	213	M8 M5	152	M8 M5	-	-	-	-	
		A	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
No recubiertos	S4	D	2.0-7.6	0.25-0.64	91	M7 FT	76	M7 FT	-	-	-	-	
		S	1.0-3.8	0.2-0.4	107	M7 FT	91	M7 FT	-	-	-	-	
		A	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	SY3	D	2.0-7.6	0.25-0.64	91	M7 FT	76	M7 FT	-	-	-	-	
		S	1.0-3.8	0.2-0.4	107	M7	91	M7	-	-	-	-	
		A	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Cermet	NTB10	D	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		S	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		A	0.3-0.8	0.05-0.15	450	F4	360	F4	300	F4	-	-	

Tabla 2: Propiedades de corte de distintos materiales

Si se aplica la fórmula anterior para hallar las revoluciones máximas, donde la variable correspondiente al diámetro se mantiene igual y la velocidad de corte varía, se obtiene el siguiente resultado:

$$n_{\text{máx}} = \frac{1000 \times V_c}{\pi \times D} \approx 3100 \text{ rpm} \quad (5.3)$$

## 6. Modelo analítico para hallar las fuerzas de sujeción

Entre los mecanismos de amarre y desamarre más importantes entre las máquinas-herramientas se encuentran los elementos porta-pinzas. Estos elementos son comúnmente utilizados para el amarre de herramientas de corte y poco a poco se han introducido para la sujeción de piezas de trabajo.

Según la norma DIN 6343 los materiales para fabricar las pinzas de sujeción deben ser aceros elásticos altamente aleados, y deben tolerar tratamientos térmicos de revenido y templado para cumplir con las durezas requeridas. Sin embargo, para el modelo descrito en este proyecto, estos requisitos de materiales son imposibles de cumplir, puesto que uno de los objetivos principales del proyecto es la fabricación por deposición fundida de bajo coste de un plato de sujeción de piezas de trabajo por expansión

Antes de analizar las fuerzas que actúan en el sistema de sujeción de piezas de trabajo se debe explicar la importancia del efecto cuña del cono. Este efecto distribuye una fuerza normal por toda la pinza con el objetivo de originar una deformación. Esta deformación produce el contacto entre la pinza y a la pieza. En el siguiente apartado se analizan y calculan las fuerzas derivadas de este sistema de sujeción.

Las fuerzas que actúan en un mandrino de sujeción de piezas por expansión se muestran en la siguiente ilustración.

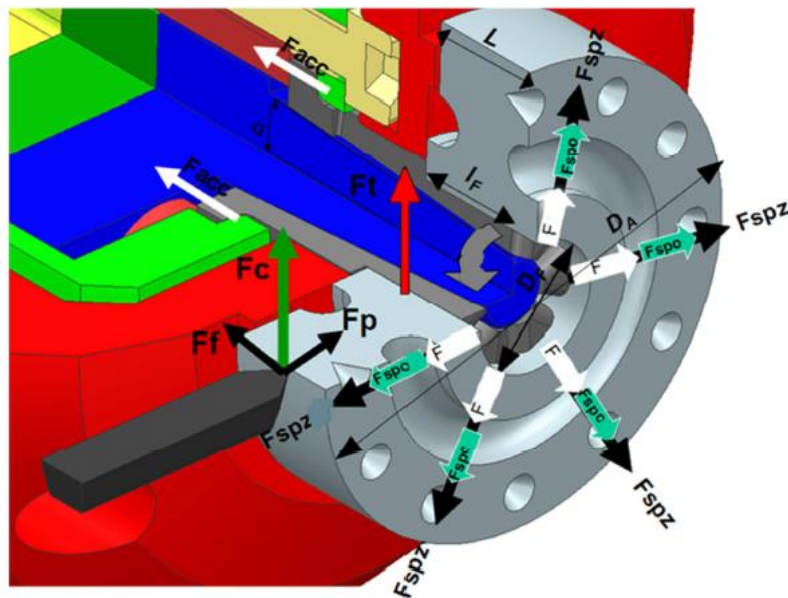


Figura 23: Ilustración representativa de las fuerzas de actuación en un plato porta-pinza expansible

Donde:

$F_c$  = Fuerza de corte principal en la herramienta de ataque radial

$F_f$  = Fuerza de avance de la herramienta de ataque axial

$F_p$  = Fuerza pasiva

$F_{spz}$  = Fuerza total de sujeción integrando la fuerza centrífuga

$F_{sp0}$  = Fuerza inicial de sujeción

$F_{cen}$  = Fuerza centrífuga del mandrino

$F_{acc}$  = Fuerza de accionamiento

$D_F$  = Diámetro de sujeción, contacto entre pinza expansible y pieza de trabajo

$D_A$  = Diámetro de mecanizado, diámetro exterior de la pieza de trabajo

$L_F$  = Longitud de la pieza que se desea mecanizar

$\alpha$  = Ángulo del cono

La fuerza que necesita la pinza expansible para sujetar la pieza a mecanizar y evitar el posible deslizamiento entre la pinza y la pieza se denomina  $F_{spz}$ , y se calcula con la siguiente fórmula:

$$F_{spz} = S_{sp} \times (S_z \times F_{sp0} \pm F_{cen}) \quad (6.1)$$

Donde cada variable hacer referencia a:

$S_{sp}$  = Coeficiente de seguridad recomendados por la norma armonizada EN 1550 y por la norma alemana VDI 3106. Este coeficiente debe ser mayor o igual a 1,5.

$S_z$  = Coeficiente de seguridad recomendados por la norma armonizada EN 1550 y por la norma alemana VDI 3106. Este coeficiente debe ser mayor o igual a 2.

El signo “+” se aplica cuando la sujeción de la pieza a mecanizar se realiza desde su diámetro interior y el signo “-” se aplica cuando la sujeción de la pieza es en su diámetro exterior.

El motivo del deslizamiento producido entre la pieza y la pinza expansible se debe al momento torsor que produce la fuerza de corte  $F_C$ . La fórmula para calcular este momento es:

$$M_T = \frac{F_C \times D_A}{2} \quad (6.2)$$

Para hallar la fuerza de sujeción es necesario conocer las variables correspondientes a la  $F_{sp0}$  y a la  $F_{cen}$ . La fuerza centrífuga  $F_{cen}$  se determina con la siguiente ecuación:

$$F_{cen} = m \times r \times w^2 = m \times \frac{v^2}{r} = m \times r \times \left(\frac{\pi \times n}{30}\right)^2 \quad (6.3)$$

Donde cada variable corresponde con:

$m$  = Masa de la pinza de sujeción. Esta masa dependerá del material plástico utilizado para la fabricación de la pinza, debido a que se van a fabricar distintas pinzas en diferentes materiales plásticos para realizar ensayos prácticos posteriores. En un principio se supondrá que esta masa corresponde al ácido poliláctico, de masa igual a  $0.018 \text{ kg}$

$r$  = Distancia en  $m$  al centro de gravedad de la pieza móvil, en este caso de la pinza expansible. Esta variable presenta un valor igual a  $14,75 \times 10^{-3} \text{ m}$

$n$  = Número de revoluciones partido por minuto. El valor es de  $7500 \text{ rpm}$  para un compuesto plástico y de  $1000 \text{ rpm}$  para un acero.

Si se sustituyen las variables el resultado es igual a:

$$F_{cen} = 0,018 \times 14,75 \times 10^{-3} \times \left(\frac{7500 \times \pi}{30}\right)^2 = 163,77 \text{ N} \quad (6.4)$$

Para una pieza fabricada en acero sin recubrimiento (S4) la fuerza centrífuga es igual a:

$$F_{cen} = 0,018 \times 14,75 \times 10^{-3} \times \left( \frac{3100 \times \pi}{30} \right)^2 = 28 \text{ N} \quad (6.5)$$

La otra variable que se debe obtener para hallar el valor de la fuerza total de sujeción es la fuerza inicial de sujeción  $F_{sp0}$ , que viene dada por la siguiente expresión:

$$F_{sp0} = \frac{F_c \times S_z}{\mu_{sp}} \times \frac{D_A}{D_F} \quad (6.6)$$

Esta expresión cuenta con dos variables,  $F_c$  y  $\mu_{sp}$ , que serán estudiadas para obtener el valor numérico de  $F_{sp0}$ .

La incógnita  $\mu_{sp}$  hace referencia al coeficiente de sujeción o coeficiente de fricción entre el contacto pinza-pieza. Este coeficiente depende de factores que corresponden tanto al tipo de superficie de contacto, a la superficie que presenta la pieza a mecanizar y a la composición material. En la siguiente tabla se comparan los distintos coeficientes de fricción para distintos materiales plásticos.

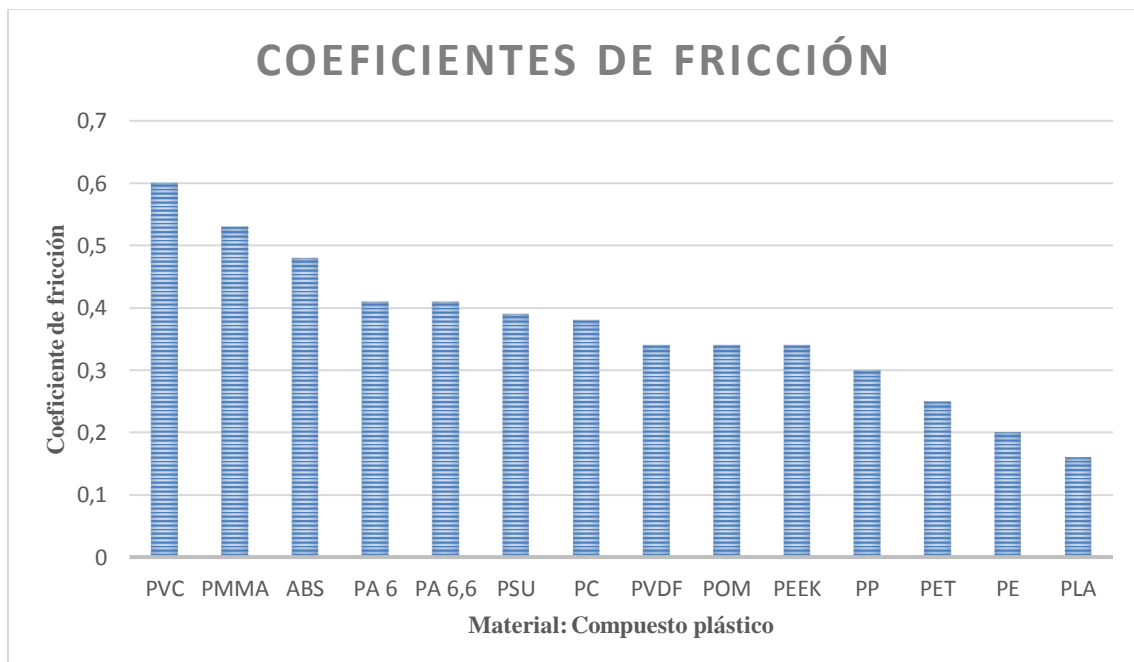


Gráfico 1: Coeficientes de fricción de compuestos plásticos

Combinaciones entre materiales		Coeficiente de fricción estático	
		Superficies limpias y secas	Superficies lubricadas
Aluminio	Aluminio	1.05 - 1.35	0.3
Acero	Acero	0.5 - 0.8	0.16
Aluminio	Acero	0.61	
Nailon	Nailon	0.15 - 0.25	
Poliestireno	Poliestireno	0.5	0.5
Poliestireno	Acero	0.3 - 0.35	0.3 - 0.35
Polietileno	Acero	0.2	0.2
Politetrafluoroetileno (PTFE)	Politetrafluoroetileno (PTFE)	0.04	0.04
Politetrafluoroetileno (PTFE)	Acero	0.05 - 0.2	

Tabla 3: Coeficientes de fricción estáticos

### 6.1. Estudio de fuerzas para contacto pinza-pieza plástico-plástico

El contacto entre la pinza expansible y la pieza depende de la composición material de cada elemento. Este estudio cuenta con una pinza expansible fabricada en impresión 3D por un compuesto plástico denominado ácido poliláctico (PLA) y la pieza que se desea mecanizar puede presentar varios tipos de materiales. Sin embargo, para este análisis de fuerzas de sujeción, se considerará que el material para el mecanizado será el mismo que el de la pinza expansible (PLA).

Una vez descrito el material que se empleará en el contacto se selecciona en la tabla su coeficiente de fricción.

$$\mu_{sp} = 0,18$$

Tras haber hallado el  $\mu_{sp}$  se procede al cálculo de la fuerza de corte  $F_c$ . Este factor se halla mediante la siguiente ecuación:

$$F_c = S \times P_s = a \times p \times P_s \quad (6.7)$$

Donde:

$S$  = Sección de la viruta en  $mm^2$

$P_s$  = Fuerza específica del corte, se mide en  $N/mm^2$

$a$  = Avance de la herramienta en  $mm^2/rpm$

$p$  = Profundidad de la herramienta en  $mm^2$

La fuerza específica de corte es un dato que se obtiene por el método experimental. Existen varios estudios que determinan el valor de esta fuerza para los materiales más utilizados en el mecanizado de piezas<sup>5</sup>.

Los factores que intervienen en el análisis de la  $P_s$  son:

---

<sup>5</sup> Observar ANEXO IV para examinar los diferentes valores de la fuerza específica de corte para cada material.

- La sección que presenta la viruta, debido a que la fuerza específica de corte disminuye al aumentar esta sección.
- El ángulo de desprendimiento<sup>6</sup>  $\gamma$  también influye en el análisis, debido a que cuanto mayor  $\gamma$  menor será  $P_s$ .

Según Kronenberg, los factores citados anteriormente pueden resumirse en la siguiente expresión:

$$P_s = \frac{C_{ps}}{A \frac{1}{E_{ps}}} = M_{ps} * C_{ps} \quad (6.8)$$

Donde:

$A$  = Sección de la viruta expresada en  $mm^2$ .

$C_{ps}$  y  $M_{ps}$  = Coeficientes específicos para cada material empleado y para cada ángulo de desprendimiento.

Si se toman como referencia estudios previos al presente proyecto los valores de avance y profundidad de corte tomarán los siguientes valores:

$$a = 0,1 \text{ mm/rev}$$

$$p = 0,25 \text{ mm}$$

Tras la deducción del valor numérico de cada variable se procede al cálculo de la fuerza de corte.

$$F_c = S \times P_s = a \times p \times P_s = 0,1 \times 0,25 \times 360 = 9 \text{ N} \quad (6.9)$$

La fuerza de sujeción de la pieza para un diámetro de amarre  $D_F = 29,5 \text{ mm}$  y para una estimación de diámetro exterior de la pieza igual a  $D_A = 50 \text{ mm}$  es igual a:

$$F_{sp0} = \frac{F_c \times S_z}{\mu_{sp}} \times \frac{D_A}{D_F} = \frac{9 \times 2}{0,18} \times \frac{50}{29,5} = 169,49 \text{ N} \quad (6.10)$$

---

<sup>6</sup> Consultar ANEXO V para apreciar la distribución angular que presenta una herramienta de corte.



Finalmente, la carga analítica que es necesario aplicar en la pinza expansible para el correcto mecanizado de una pieza de dimensiones determinadas y evitar así los posibles movimientos producidos por deslizamientos es:

$$F_{spz} = S_{sp} \times (S_z \times F_{sp0} \pm F_{cen}) = 1,5 \times (2 \times 169,49 - 163,77) \quad (6.11)$$

$$F_{spz} = 262,815 \text{ N}$$

## 6.2. Estudio de fuerzas para contacto pinza-pieza plástico-acero

El desarrollo de los siguientes cálculos presenta una gran diferencia con respecto a los valores obtenidos para el análisis anterior.

En primer lugar, el coeficiente de fricción varía y toma el siguiente valor:

$$\mu_{sp} = 0,3$$

El cálculo de la fuerza de corte varía notablemente debido a que se torneará un acero de dimensiones similares a las anteriores. En este caso el valor del avance y profundidad para un acero es:

$$a = 0,2 \text{ mm/rev}$$

$$p = 1 \text{ mm}$$

Cabe destacar que estos valores se han tomado de análisis detallados de estudios anteriores en los que se ha demostrado el rango de valores más óptimo.

Para una fuerza de corte de  $1860 \text{ N/mm}^2$  se obtiene que:

$$F_c = S \times P_s = a \times p \times P_s = 0,2 \times 1 \times 1980 = 396 \text{ N} \quad (6.12)$$

La fuerza de sujeción de la pieza para un diámetro de amarre  $D_F = 29,5 \text{ mm}$  y para una estimación de diámetro exterior de la pieza igual a  $D_A = 50 \text{ mm}$  es igual a:

$$F_{sp0} = \frac{F_c \times S_z}{\mu_{sp}} \times \frac{D_A}{D_F} = \frac{396 \times 2}{0,3} \times \frac{50}{29,5} = 4,5 \text{ KN} \quad (6.12)$$

Finalmente, la fuerza que es necesario aplicar para evitar el movimiento relativo entre la pinza expansible y la pieza que se desea mecanizar es:

$$F_{spz} = S_{sp} \times (S_z \times F_{sp0} \pm F_{cen}) = 1,5 \times (2 \times 4474,57 - 163,77) \quad (6.13)$$

$$F_{spz} = 13,12 \text{ KN}$$

### 6.3. Estudio de fuerza para contacto pinza-pieza en acero-acero

El primer factor que se debe estimar es el coeficiente de fricción para un contacto acero-acero. Según la tabla especificada anteriormente se estima que este valor para este tipo de contacto es:

$$\mu_{sp} = 0,16$$

Los valores de las variables correspondientes al avance, profundidad y fuerza específica de corte para mecanizar un material compuesto de acero han sido determinados para el caso anterior y presentan unos valores de:

$$a = 0,2 \text{ mm/rev}$$

$$p = 1 \text{ mm}$$

$$P_s = 1860 \text{ N/mm}^2$$

$$F_c = S \times P_s = a \times p \times P_s = 0,2 \times 1 \times 1860 = 372 \text{ N} \quad (6.14)$$

En siguiente paso es determinar la fuerza inicial de amarre para el contacto que presentan dos materiales compuestos en acero.

$$F_{sp0} = \frac{F_c \times S_z}{\mu_{sp}} \times \frac{D_A}{D_F} = \frac{372 \times 2}{0,16} \times \frac{50}{29,5} = 7,88 \text{ KN} \quad (6.15)$$

Finalmente, la fuerza para amarrar la pieza que se desea mecanizar en acero y evitar el posible deslizamiento o movimiento relativos entre la pieza y la pinza de sujeción por expansión es:

$$F_{spz} = S_{sp} \times (S_z \times F_{sp0} \pm F_{cen}) = 1,5 \times (2 \times 7881,36 - 28) = 23,6 \text{ KN} \quad (6.16)$$

#### 6.4. Estudio de fuerzas para contacto pinza-pieza en acero-plástico

Para el cálculo de fuerzas en este estudio se realizará una recopilación de las propiedades seleccionadas para los estudios de fuerzas desarrollados anteriormente.

Cabe destacar que el contacto acero-plástico presenta un coeficiente de fricción igual a:

$$\mu_{sp} = 0,3$$

Los valores de avance, profundidad y fuerza de corte específica toman los siguientes valores numéricos:

$$a = 0,1 \text{ mm/rev}$$

$$p = 0,25 \text{ mm}$$

$$P_s = 360 \text{ N/mm}^2$$

La ecuación para la determinación del amarre inicial para el mecanizado de una pieza de acero es igual a:

$$F_c = S \times P_s = a \times p \times P_s = 0,1 \times 0,25 \times 360 = 9 \text{ N} \quad (6.17)$$

$$F_{sp0} = \frac{F_c \times S_z}{\mu_{sp}} \times \frac{D_A}{D_F} = \frac{9 \times 2}{0,3} \times \frac{50}{29,5} = 101,69 \text{ N} \quad (6.18)$$

Para la estimación de la fuerza que evita el movimiento relativo entre la pinza y la pieza se resuelve la siguiente ecuación.

$$F_{spz} = S_{sp} \times (S_z \times F_{sp0} \pm F_{cen}) = 1,5 \times (2 \times 101,69 - 28) = 263,07 \text{ N} \quad (6.19)$$

## 7. Análisis de la pinza expansible en estado estático

El estudio inicial que describe el comportamiento de la pinza expansible del prototipo de mandrino propuesto consistirá en un análisis de esfuerzos en estado estático. Para este análisis se aplicarán cargas distribuidas en la superficie interior de la pinza para producir una deformación. La expansión de la pinza será necesaria para la sujeción de la pieza que se requiere mecanizar. El resultado obtenido de los cálculos es únicamente aplicable a la pinza en un instante de tiempo en el que no se ha establecido el contacto con la pieza.

Las condiciones de contorno impuestas en el estudio son:

- Ausencia de movimiento de rotación ( $\nexists \text{ rpm}$ )
- No existe contacto entre pinza-pieza
- Parte interior central de la pinza fija en sus seis grados de libertad
- Aplicar la fuerza de forma perpendicular a la superficie de expansión interna

La deformación máxima que puede sufrir la pinza expansible puede calcularse observando el diseño del plato propuesto. Por este motivo, la expansión máxima que puede sufrir la pinza cuando se desplaza por la superficie cónica del plato presenta un valor de deformación radial de  $1,5 \text{ mm}$ . Sin embargo, el valor máximo de deformación nunca se podría alcanzar previo al contacto, debido a que la función de la pinza no cumpliría el objetivo de sujeción. Para evitar este suceso se establece una deformación radial máxima previa a la sujeción de elementos de  $1,4 \text{ mm}$ .

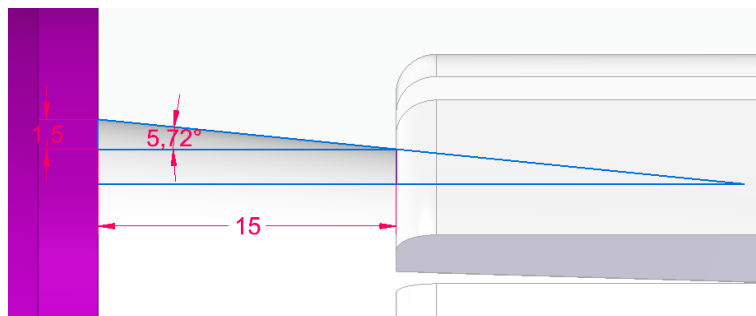


Figura 24: Variación angular en el recorrido del plato cónico

Esta tarea se realizará mediante el análisis por elementos finitos que proporciona el programa de parametrizado de CAD de elementos tridimensionales denominado Solid Edge ST9. Este programa informático podrá calcular el valor numérico referente a la fuerza de accionamiento ( $F_{acc}$ ) necesaria para producir la deformación. El cálculo de esta variable permite obtener la fuerza del pistón, que posibilita el funcionamiento de la pinza, mediante el uso del equilibrio de fuerzas. La fuerza del pistón se designará con la variable  $F_p$ .

Un factor decisivo que condiciona el comportamiento de la pinza es el material empleado en su fabricación. Se tomará como material de referencia el acero para compararlo con el resultado obtenido del uso de distintos materiales plásticos.

Las fichas de las características técnicas que presentan los materiales empleados para la fabricación de la pinza se muestran a continuación:

Mostrando propiedades de: PLA Premium (Materials\No metales\Plásticos)

Estilo de cara

Blanco

Administrar estilos...

Estilo de relleno

ANSI34(Plástico)

Administrar estilos...

Propiedades

Nombre de propiedad	Valor	Elimin...	Editar...
Densidad	1240,000 kg/m^3		
Coefficiente de expansión térmica	0,0000 /C		
Conductividad térmica	0,000 kW/m-C		
Calor específico	0,000 J/kg-C		
Módulo de elasticidad	3800,000 MPa		
Coefficiente de Poisson	0,400		
Límite de elasticidad	55,000 MPa		
Tensión de rotura	83,000 MPa		
Elongación %	6,000		

Descripción

Definición de material = PLA Premium, Estilo de cara = Blanco, Estilo de relleno = ANSI34(Plástico)

Material aplicado actualmente al modelo: PLA Premium (Materials\No metales\Plásticos)

Mostrando propiedades de: PolyMax PLA (Materials\No metales\Plásticos)

Estilo de cara

Cian

Administrar estilos...

Estilo de relleno

ANSI34(Plástico)

Administrar estilos...

Propiedades



Nombre de propiedad	Valor	Elimin...	Editar...
Densidad	1170,000 kg/m^3		
Coefficiente de expansión térmica	0,0000 /C		
Conductividad térmica	0,000 kW/m-C		
Calor específico	0,000 J/kg-C		
Módulo de elasticidad	1879,000 MPa		
Coefficiente de Poisson	0,400		
Límite de elasticidad	28,100 MPa		
Tensión de rotura	0,000 MPa		
Elongación %	1,360		


Descripción

Definición de material = PolyMax PLA, Estilo de cara = Cian, Estilo de relleno = ANSI34(Plástico)

Material aplicado actualmente al modelo: PLA Premium (Materials\No metales\Plásticos)

Mostrando propiedades de: **Nailon, propósto general (Materials\No metales\Plásticos)**

Estilo de cara: **Blanco**  

Estilo de relleno: **ANSI34(Plástico)** 



Administrar estilos...


Nombre de propiedad	Valor	Elimin...	Editar...
Densidad	1220,000 kg/m <sup>3</sup>		
Coefficiente de expansión térmica	0,0000 /C		
Conductividad térmica	0,002 kW/m-C		
Calor específico	1675,000 J/kg-C		
Módulo de elasticidad	1378,951 MPa		
Coefficiente de Poisson	0,400		
Límite de elasticidad	37,921 MPa		
Tensión de rotura	0,000 MPa		
Elongación %	0,000		

Descripción  
Definición de material = Nailon, propósto general, Estilo de cara = Blanco, Estilo de relleno = ANSI34(Plástico)

Material aplicado actualmente al modelo: **Nailon, propósto general (Materials\No metales\Plásticos)**

Mostrando propiedades de: **ABS, alto impacto (Materials\No metales\Plásticos)**

Estilo de cara: **Rojo**  

Estilo de relleno: **ANSI34(Plástico)** 



Administrar estilos...


Nombre de propiedad	Valor	Elimin...	Editar...
Densidad	1024,000 kg/m <sup>3</sup>		
Coefficiente de expansión térmica	0,0001 /C		
Conductividad térmica	0,000 kW/m-C		
Calor específico	0,000 J/kg-C		
Módulo de elasticidad	1378,951 MPa		
Coefficiente de Poisson	0,400		
Límite de elasticidad	31,026 MPa		
Tensión de rotura	0,000 MPa		
Elongación %	0,000		

Descripción  
Definición de material = ABS, alto impacto, Estilo de cara = Rojo, Estilo de relleno = ANSI34(Plástico)

Material aplicado actualmente al modelo: **PLA Premium (Materials\No metales\Plásticos)**

Mostrando propiedades de: **Acero C45 (Materials-DIN\Steel\Steel - Unalloyed)**

Estilo de cara: **Steel**  

Estilo de relleno: **Normal** 

Administrar estilos...

Nombre de propiedad	Valor	Elimin...	Editar...
Densidad	7750,000 kg/m <sup>3</sup>		
Coefficiente de expansión térmica	0,0000 /C		
Conductividad térmica	0,015 kW/m-C		
Calor específico	480,000 J/kg-C		
Módulo de elasticidad	193000,000 MPa		
Coefficiente de Poisson	0,310		
Límite de elasticidad	1200,000 MPa		
Tensión de rotura	4000,000 MPa		
Elongación %	0,000		

Descripción  
Definición de material = Acero C45, Estilo de cara = Steel, Estilo de relleno = Normal

Material aplicado actualmente al modelo: **Acero C45 (Materials-DIN\Steel\Steel - Unalloyed)**

Tabla 4: Ficha de características técnicas de los materiales empleados para la fabricación de la pinza

## 7.1. Pinza fabricada en ácido poliláctico (PLA Premium)

Para el análisis de la pinza expansible fabricada en PLA Premium se diseñarán unas gráficas donde se representa como actúa la fuerza y la tensión de Von Mises.

En la primera gráfica se observa la fuerza total empleada en función de la deformación diametral que tiene lugar en el elemento de expansión.

Cabe destacar que el material empleado no soportar la deformación máxima tiene lugar en la superficie cónica del plato porque supera el límite elástico. Por este motivo, se

tomará como valor límite de deformación aquel corresponda con el límite elástico del material.

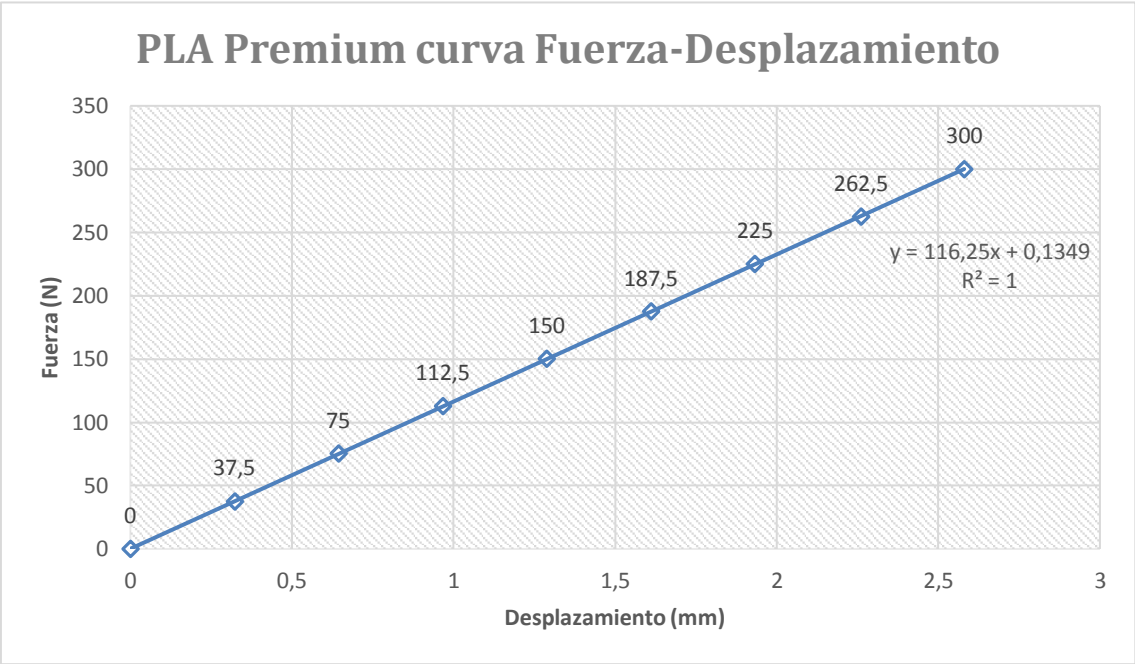


Gráfico 2: PLA Premium Fuerza-Deformación

En la segunda gráfica se puede comprobar el valor que alcanza la tensión de Von Mises para originar la deformación máxima que soporta el material dentro de un régimen elástico.

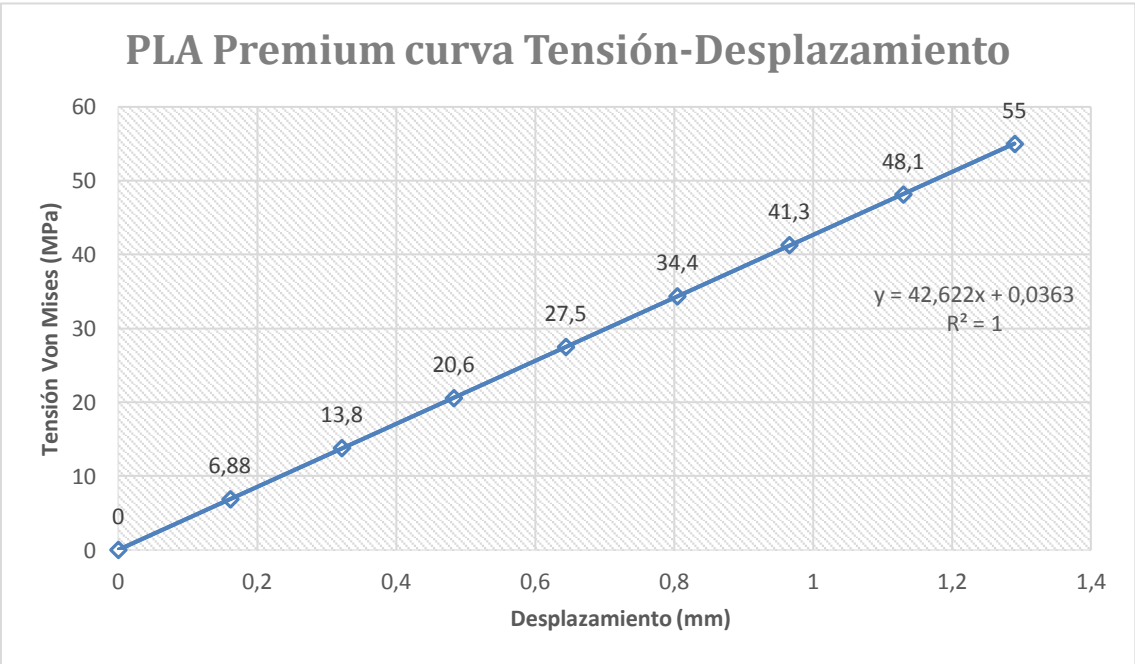


Gráfico 3: PLA Premium Tensión-Desplazamiento

Una vez que se han obtenido los gráficos, donde se observa el valor límite de fuerza aplicada, se procede al cálculo de la fuerza que debe ejercer el pistón.

$$F_{acc} = 300 \text{ N}$$

El esquema que muestra el equilibrio de fuerzas actuantes en el mandrino es el siguiente:

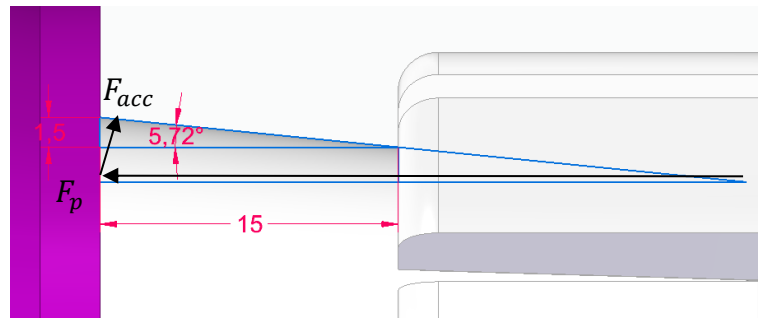


Figura 25: Fuerza de reacción en el mandrino

$$F_p = \frac{F_{acc}}{\sin 5,72} = 3010,021 \text{ N} \quad (7.1)$$

## 7.2. Pinza fabricada en ácido poliláctico (PLA PolyMax)

Similar al caso estudiado anteriormente se realizará un estudio gráfico donde se podrá observar cómo actúan las cargas sobre el elemento simulado.

El estudio estático de la pinza se situará dentro del rango elástico de los materiales empleados.



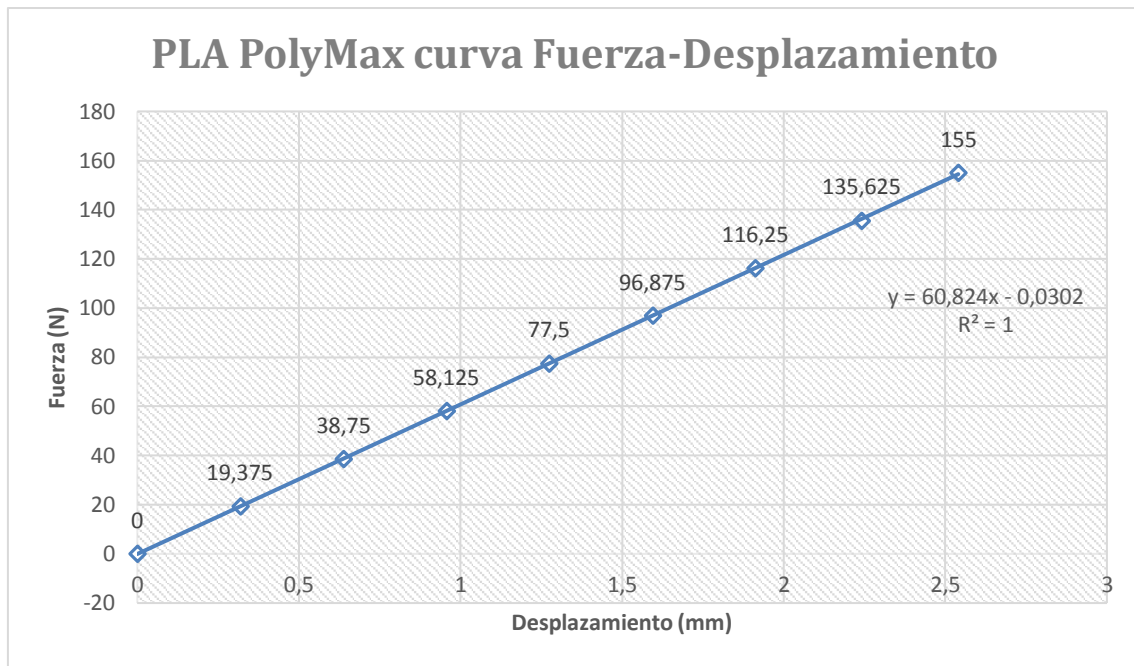


Gráfico 4: PLA PolyMax Fuerza-Desplazamiento

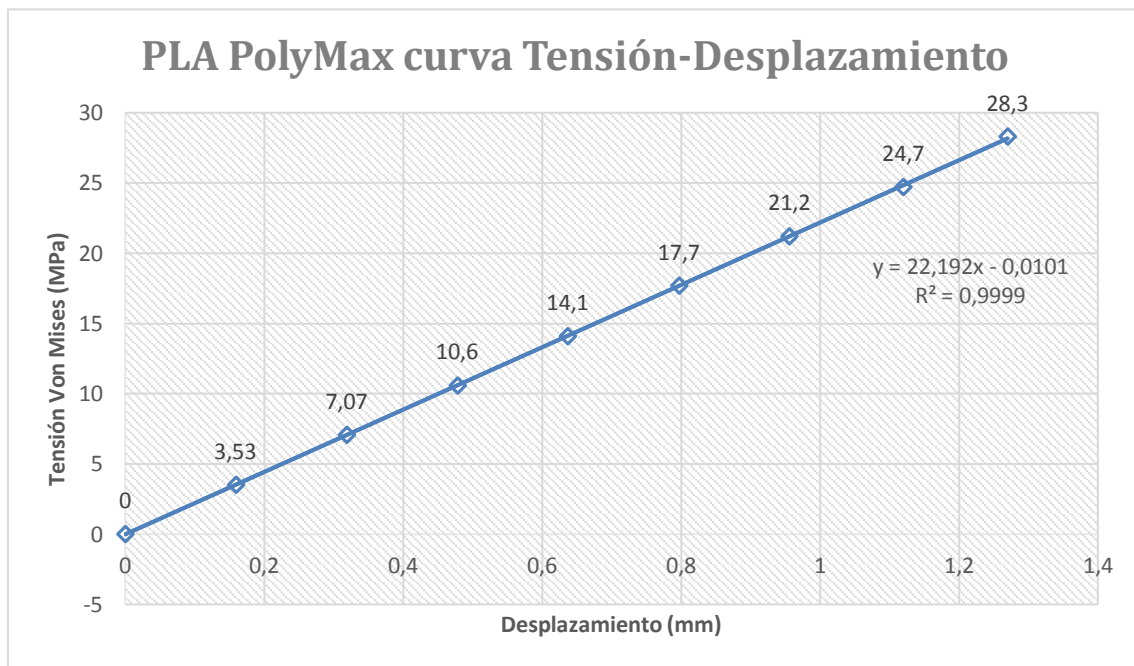


Gráfico 5: PLA PolyMax Tensión-Desplazamiento

### 7.3. Pinza fabricada en Nylon

Para una pinza fabricada en un compuesto plástico denominado Nylon se obtienen las siguientes representaciones gráficas.

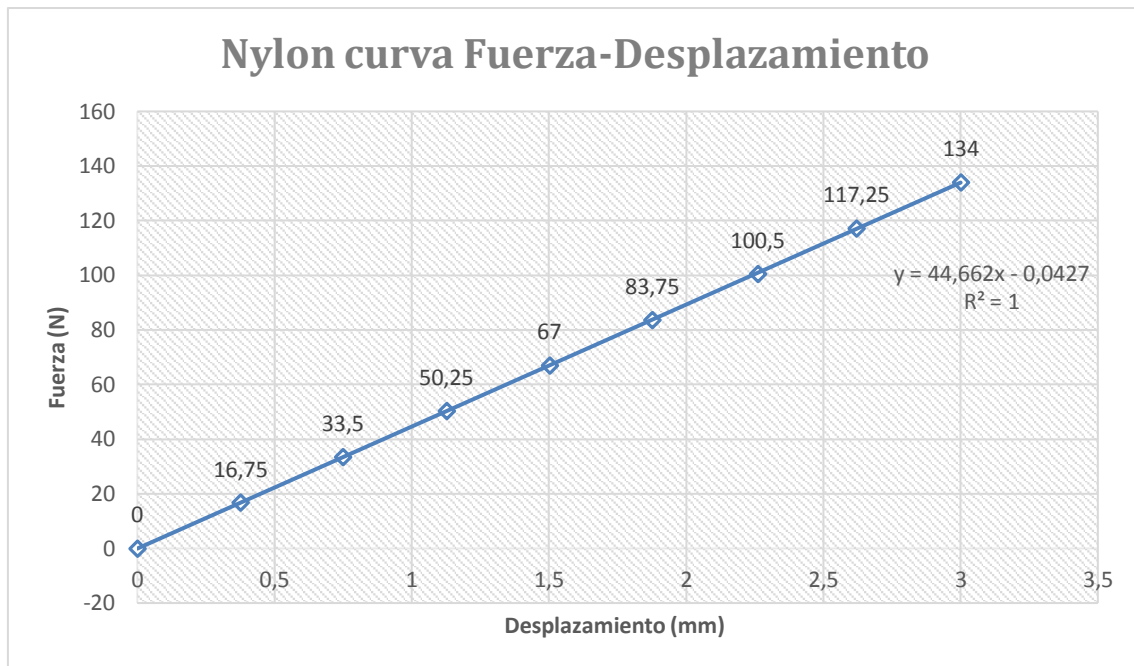


Gráfico 6: Nylon Fuerza-Desplazamiento

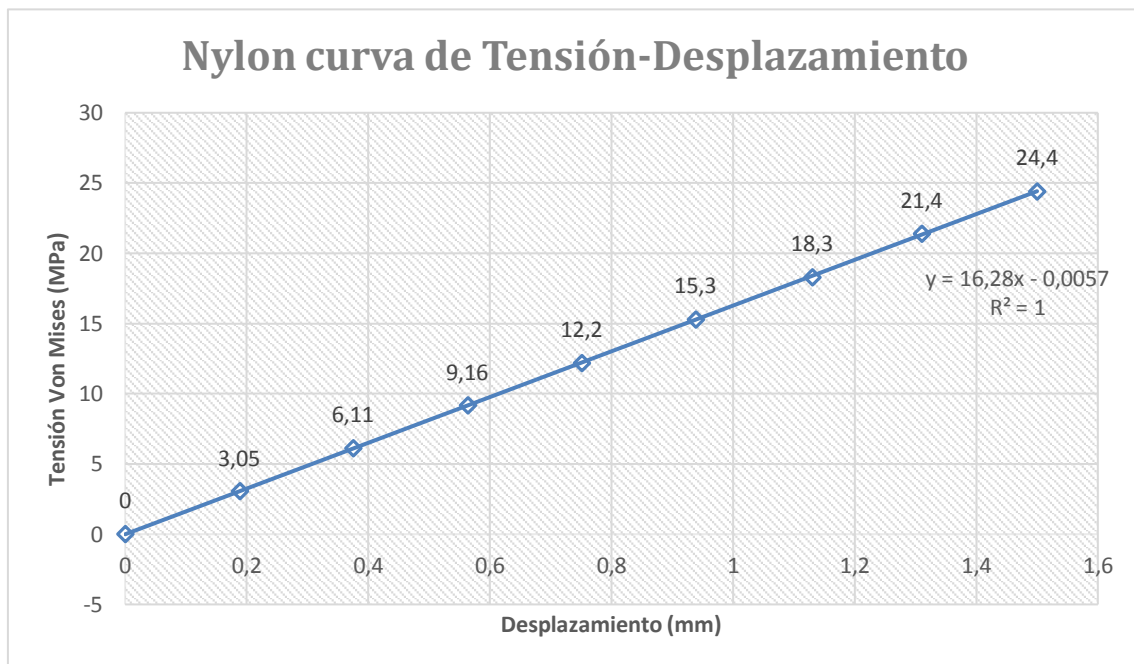


Gráfico 7: Nylon Tensión-Desplazamiento

#### 7.4. Pinza fabricada en ABS

Al seleccionar el material plástico denominado acrilonitrilo butadieno, más conocido por el nombre de ABS, se obtienen unas relaciones gráficas muy similares a las que proporciona el Nylon, debido a que comparte exactamente el mismo Módulo Elástico

(13789,951 MPa). Aunque las demás propiedades del material no sean exactamente iguales, su diferencia es casi despreciable y no intervienen en el estudio gráfico.

Cabe destacar que el material ABS presenta un menor límite elástico que el Nylon, es decir, que alcanza antes la zona de plastificación que el Nylon.

### 7.5. Pinza fabricada en Acero

El acero empleado para fabricar la pinza estará normalizado de acuerdo a la norma alemana DIN 6343. Según la DIN 6343 la pinza expansible de amarre de piezas debe estar compuesto de aceros altamente aleados con Cromo, Molibdeno y Vanadio, que soporten tratamientos térmicos como el revenido y el templado, de tal forma que se consiga una dureza de entre 58-60 HRC en la cabeza de sujeción y entre 42-45 HRC en cuerpo del diseño.

El acero que se ha seleccionado para el estudio de la pinza es del tipo C45E según la norma EN 10083 (para la norma UNE 36011-12 es un acero F1140). Presenta la siguiente composición química.

Análisis sobre colada								
Contenido (%)								
C	Si <sub>máx.</sub>	Mn	P <sub>máx.</sub>	S <sub>máx.</sub>	Cr <sub>máx.</sub>	Mo <sub>máx.</sub>	Ni <sub>máx.</sub>	Cr+Mo+Ni <sub>máx.</sub>
0,42 - 0,50	0,40	0,50 - 0,80	0,035	0,035	0,40	0,10	0,40	0,63

Desviaciones admisibles entre el análisis del producto y los valores especificados para el análisis de colada								
Elemento	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
Desviación admisible	±0,02	±0,03	±0,04	±0,005	±0,005	±0,05	±0,03	±0,05

Tabla 5: Composición química acero C45E

El estudio gráfico de los ensayos sometidos a la pinza compuesta por este tipo de acero muestra los siguientes resultados.

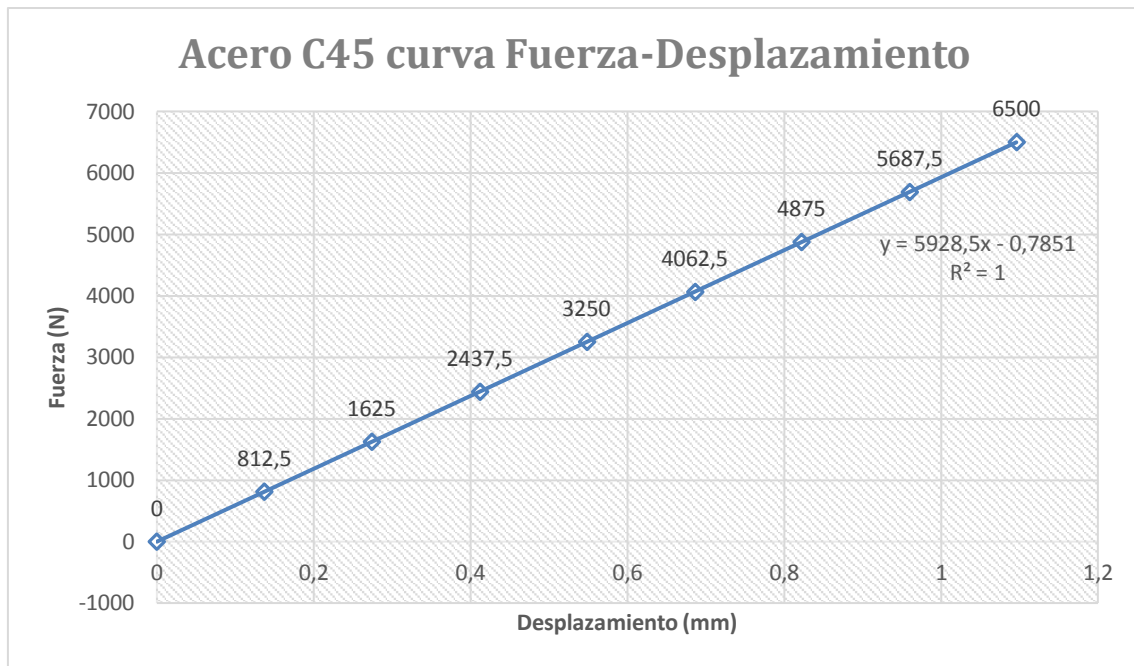


Gráfico 8: Acero C45 Fuerza-Desplazamiento

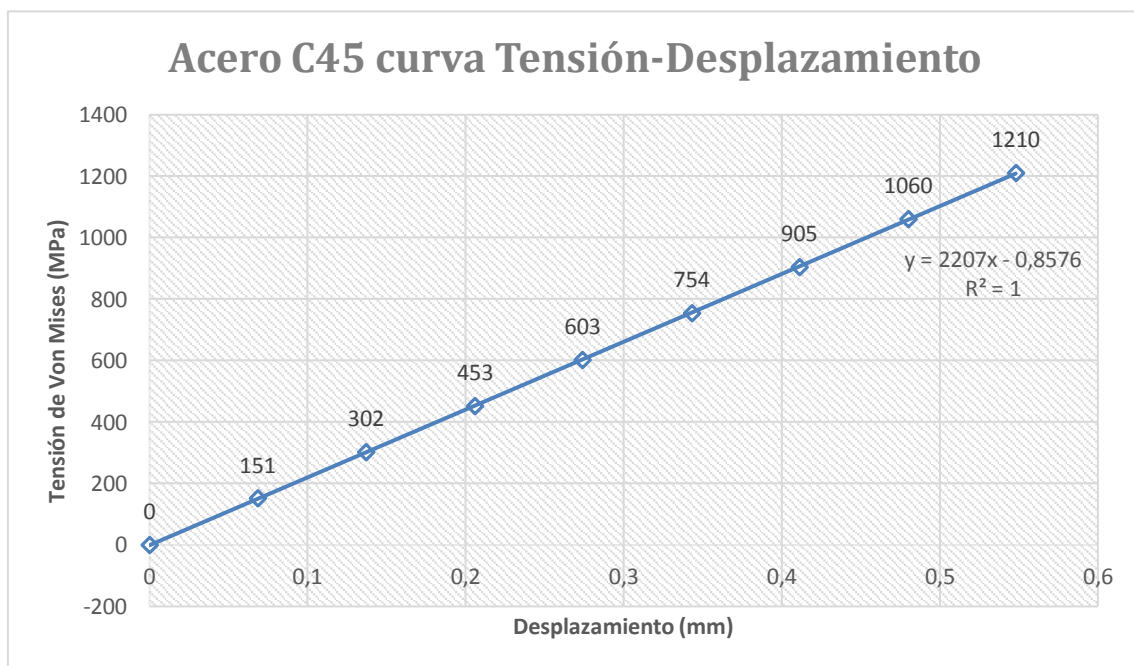
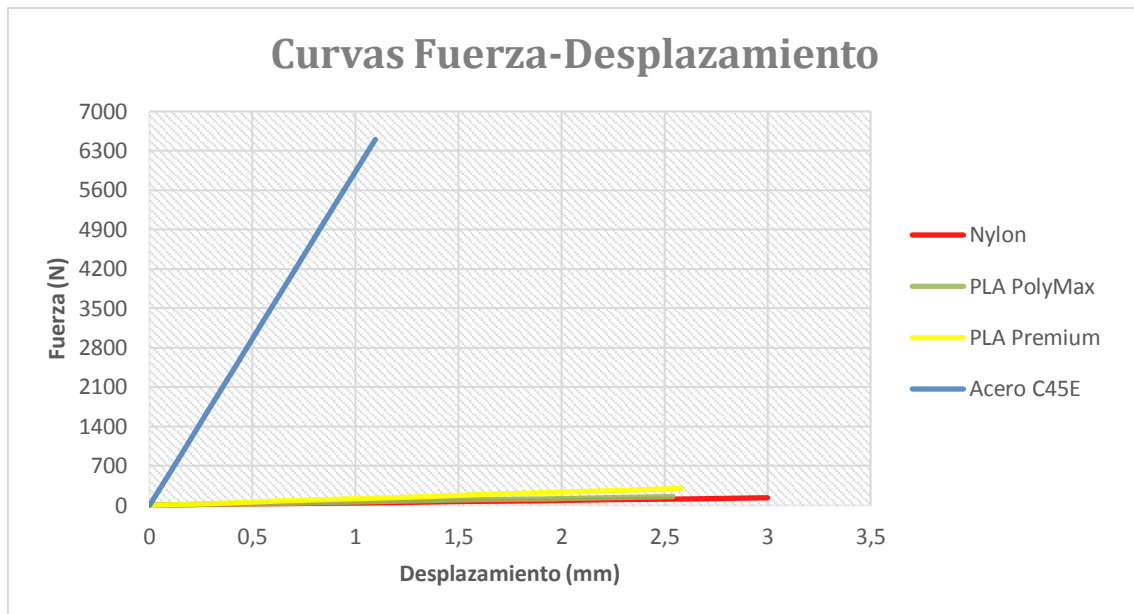


Gráfico 9: Acero C45 Tensión-Desplazamiento

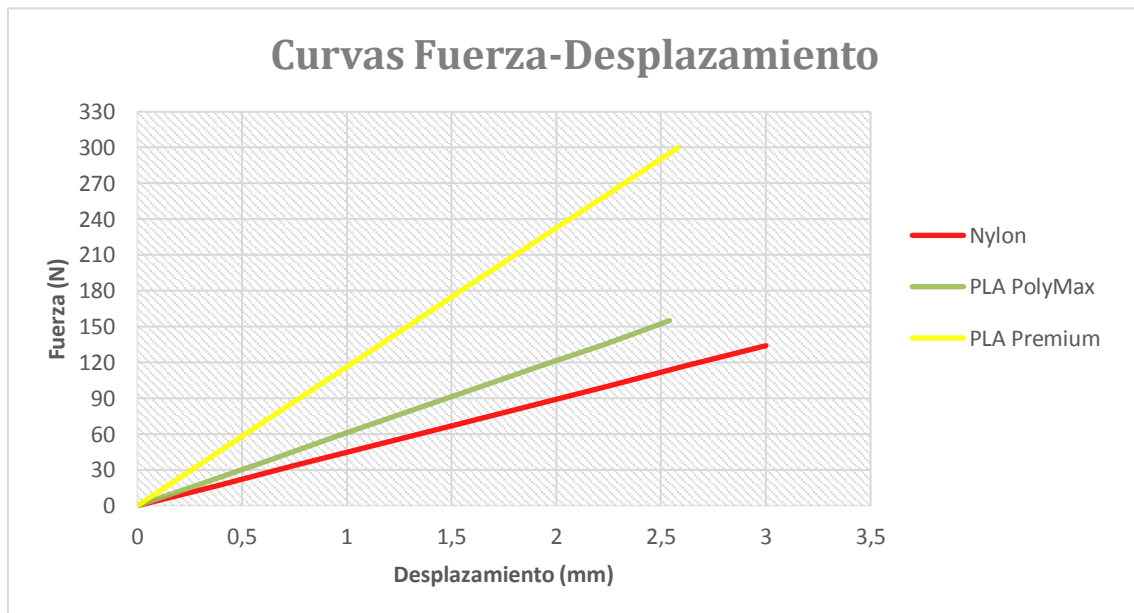
## 7.6. Resultados

A continuación, se compararán los diferentes gráficos para los distintos materiales estudiados. Lo más interesante de este ejercicio es observar el comportamiento mecánico que presentan los compuestos plásticos frente a un tipo de acero normalizado para la fabricación de pinzas expansibles (Acero C45E).



*Gráfico 10: Resumen I curvas Fuerza-Desplazamiento*

Para examinar de una forma más exhaustiva el comportamiento de los diferentes materiales plásticos se han analizado estos últimos más detalladamente en el siguiente gráfico.



*Gráfico 11: Resumen II curvas Fuerza-Desplazamiento*

El estudio de la tensión de Von Mises que origina la máxima deformación de cada material dentro del régimen elástico de cada uno se resume en los sucesivos gráficos.

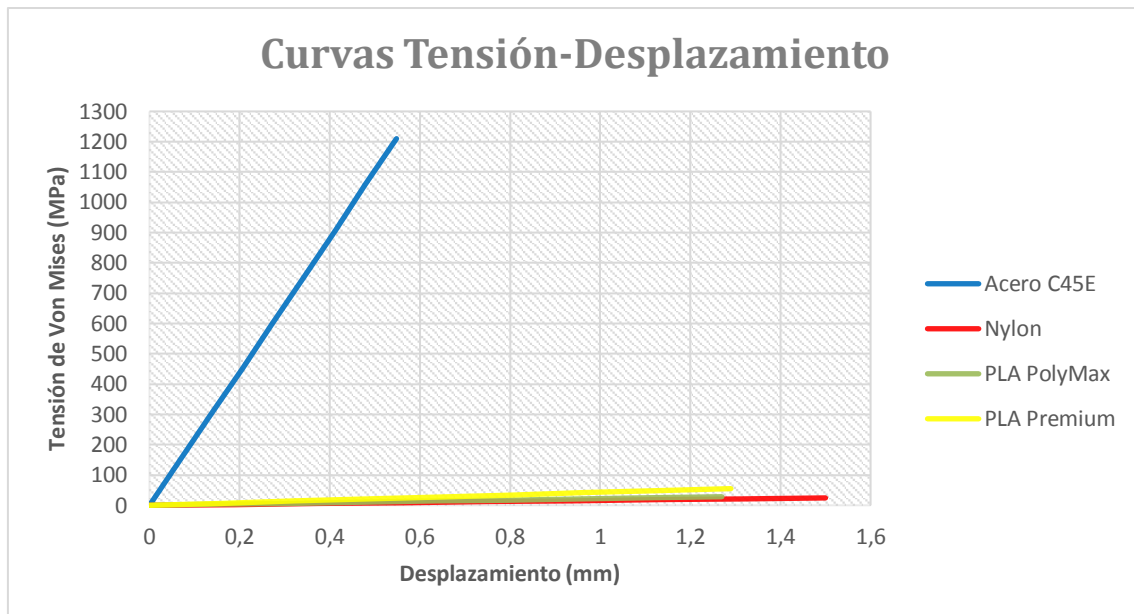


Gráfico 12: Resumen I curvas Tensión-Desplazamiento

La relación más detallada entre los diferentes materiales plásticos se muestra en el siguiente gráfico.

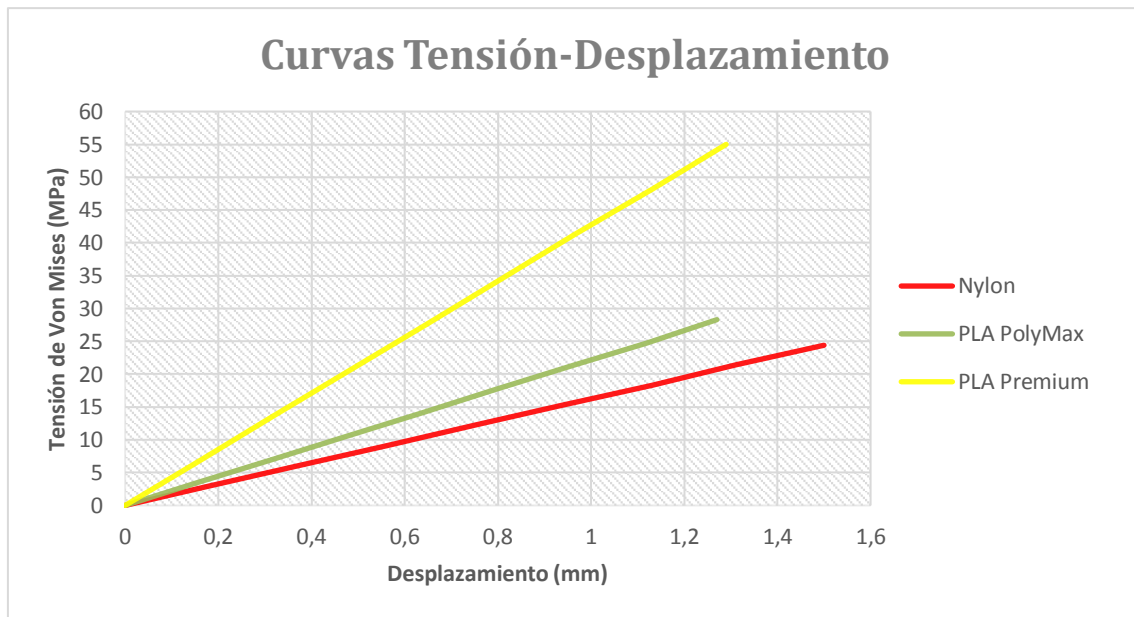


Gráfico 13: Resumen II curvas Tensión-Desplazamiento

## 8. Estudio no lineal de la pinza expansible

Para el estudio no lineal de la pinza expansible se ha analizado el contacto entre las diferentes piezas del mandrino con la versión estudiante del ANSYS Workbench 19.0. Este programa, al ser una versión estudiante, está limitado en muchos aspectos.

Una de las limitaciones que presenta es la restricción del número de nodos a la hora de mallar una pieza. Por este motivo, no se ha podido realizar un análisis de la pieza al completo para observar como interactúan entre sí cada uno de los componentes que constituyen el mandrino de la pinza expansible. Un análisis ideal del prototipo sería el representado en la siguiente imagen.

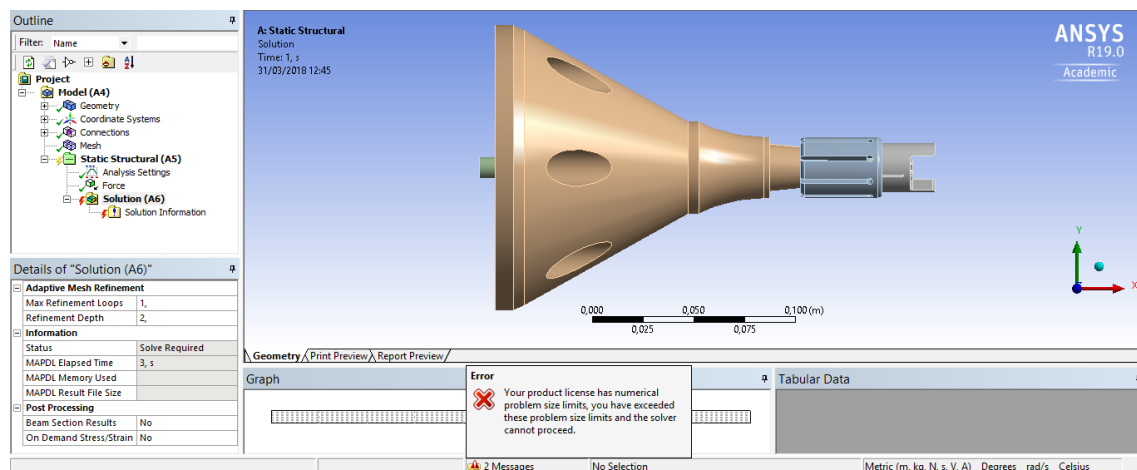


Figura 26: Representación del modelo I en ANSYS

Sin embargo, los mensajes de error debido a la exportación de la pieza en CAD y al exceso del número de nodos originan que el programa no compile y no llegue por tanto a una solución final en el proyecto de estudio de fuerzas, que tiene lugar durante el contacto de los componentes principales del mandrino.

Para intentar minimizar el número de nodos durante el mallado del prototipo se han restringido casi todos los componentes de la pieza. Así el objetivo se ha reducido a observar el contacto entre el plato y la pinza expansible. De esta forma se intentará representar un pequeño estudio no lineal entre un contacto plato-pinza.

Tras intentar realizar este estudio no lineal surgen los mismos inconvenientes que en el anterior análisis.

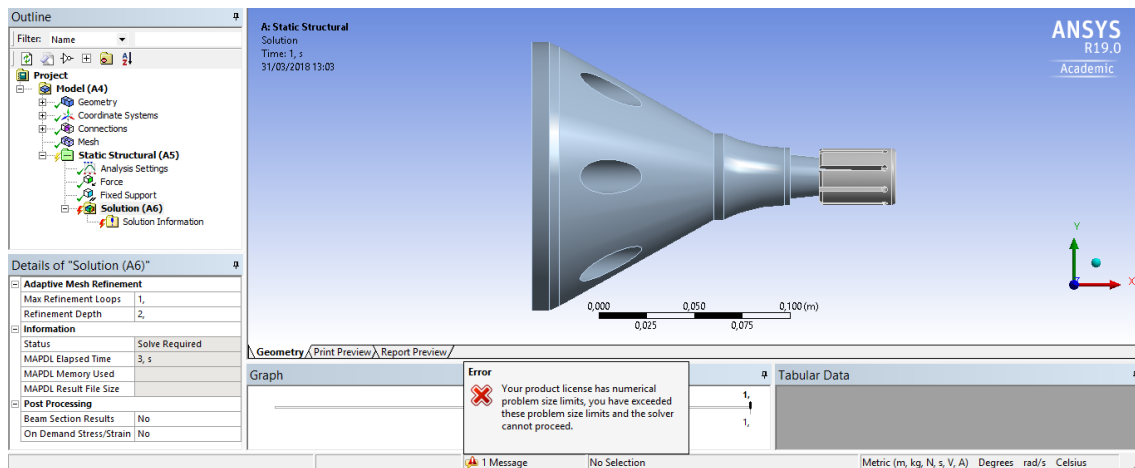


Figura 27: Representación del modelo II en ANSYS

En consecuencia, como último recurso, se redujo el plato cónico a una simple pieza que simula la trayectoria cónica que debe recorrer la pinza expansible.

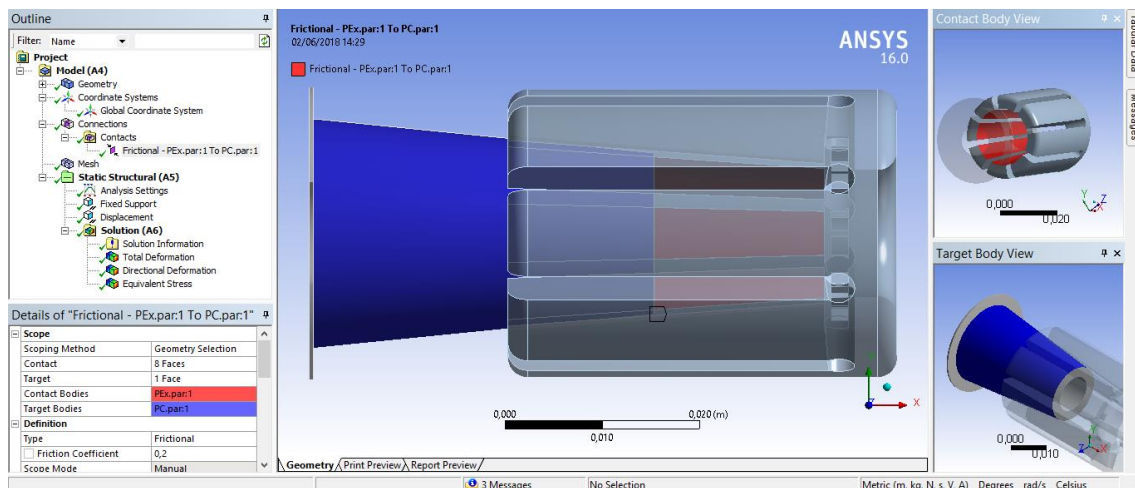


Figura 28: Contacto no lineal entre la pinza y el plato cónico

## 8.1. Estudio inicial de no linealidad

Para el estudio inicial de no linealidad se empleará el diseño propuesto en la figura 23 para analizar detalladamente el contacto entre la pinza expansible y el cono. En la figura mencionada puede observarse la región de contacto utilizada.

El estudio no lineal tendrá como objetivo principal observar el comportamiento mecánico de la pinza expansible y compararlo entre un material plástico y un acero normalizado.



Uno de los problemas que surge a lo hora de emplear una licencia académica es la imposibilidad de introducir materiales en el programa de Elementos Finitos. Por consiguiente, se emplearon los materiales más similares en comportamiento mecánico, a un material plástico y a un acero C45E.

#### 8.1.1. Pinza expansible compuesta por material plástico

El estudio de contacto para una pinza expansible compuesta por un material similar mecánicamente a un plástico revela los siguientes resultados.

Con respecto al estudio de la tensión de Von Mises, para un desplazamiento horizontal de unos 12 mm, se observa que el material llega casi a plastificar. El valor de la tensión de Von Mises para este desplazamiento alcanza los 52,3 MPa. En la siguiente representación del modelo se puede examinar como actúa la tensión. Mediante la barra de colores se puede contemplar en que secciones de la pieza existen los mayores concentradores de tensiones.

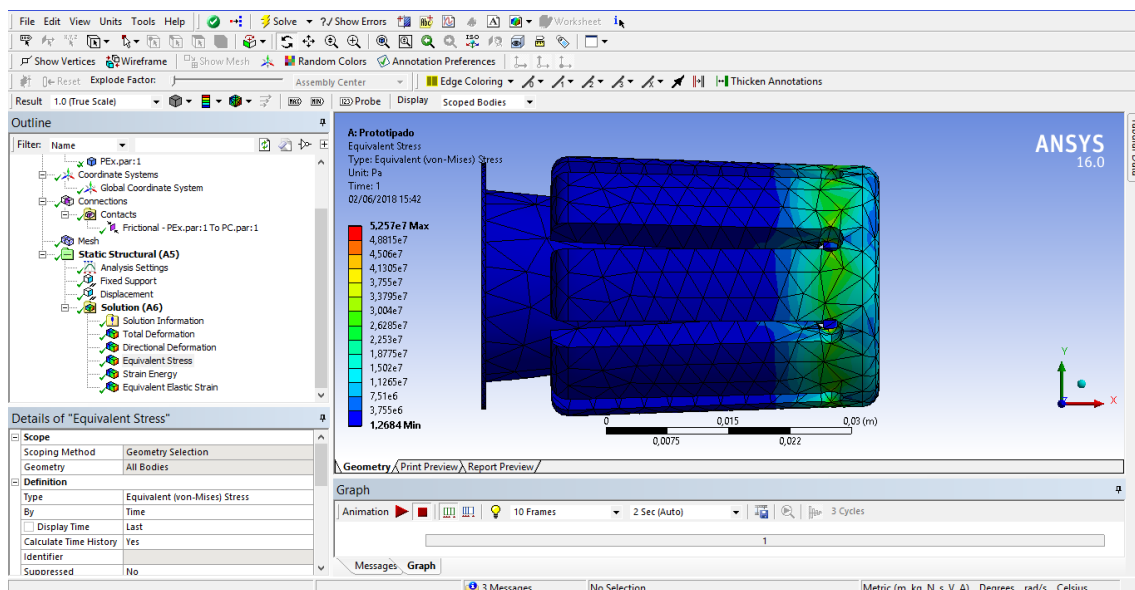


Figura 29: Tensiones de Von Mises para pieza plástica

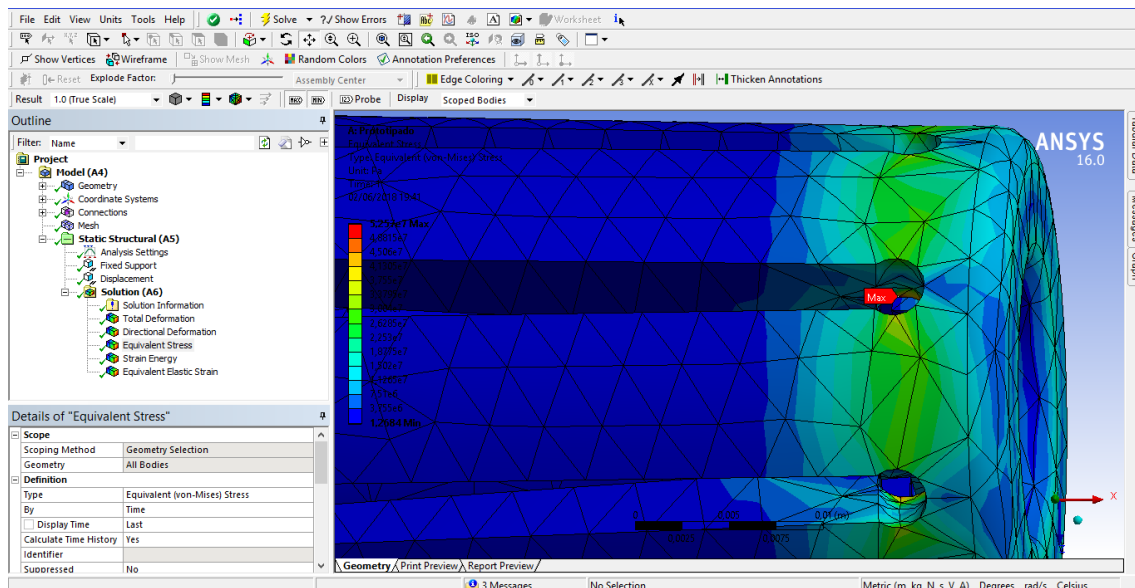


Figura 30: Representación del punto de concentración de tensiones en pieza plástica

La representación del desplazamiento horizontal se muestra en la siguiente figura.

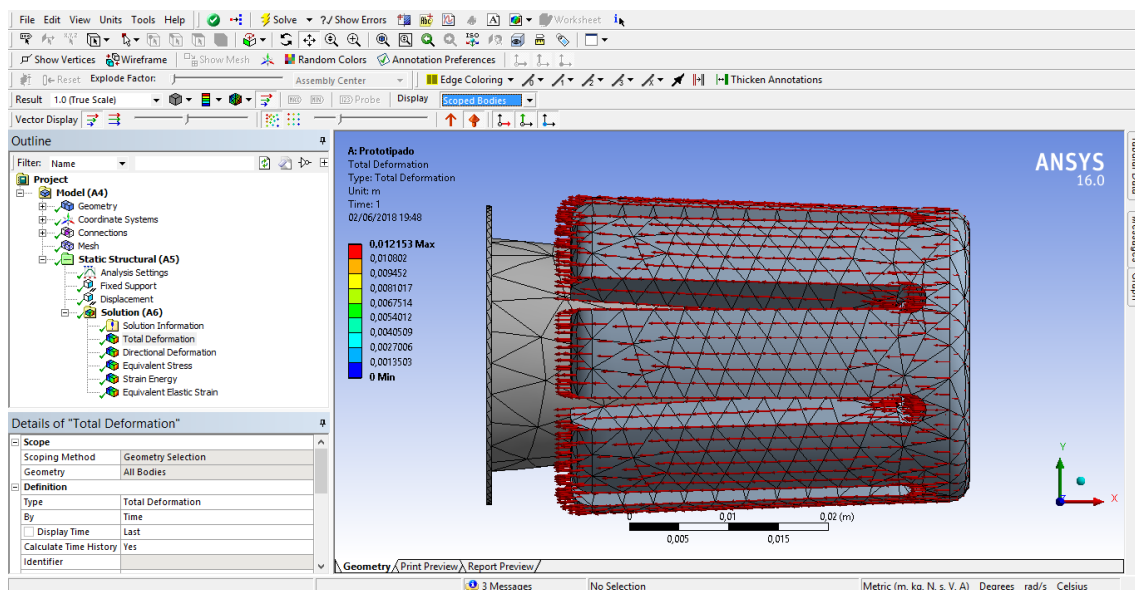


Figura 31: Diagrama de deformaciones en pieza plástica

### 8.1.2. Pinza expansible compuesta por un material de acero

Para el estudio de la pinza expansible para un acero, cabe destacar que las propiedades del acero seleccionado para el análisis presentan unas propiedades mecánicas bastante inferiores a las del acero normalizado para la fabricación de mandrino (Acero F1140 o C45E). Sin embargo, como se ha comentado anteriormente, ha sido imposible modificar

las características que presentan los materiales integrados en la biblioteca del programa por ser una versión estudiante.

En la siguiente tabla proporcionada por el programa para el Cálculo por Elementos Finitos se encuentran las características principales del acero seleccionado para el análisis.

Property	Value	Unit
Density	7850	kg m^-3
Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
Isotropic Elasticity		
Derive from	Young's Modulus and Poisson's R...	
Young's Modulus	2E+11	Pa
Poisson's Ratio	0,3	
Bulk Modulus	1,6667E+11	Pa
Shear Modulus	7,6923E+10	Pa
Field Variables		
Temperature	Yes	
Shear Angle	No	
Degradation Factor	No	
Alternating Stress Mean Stress	Tabular	
Strain-Life Parameters		
Tensile Yield Strength	2,5E+08	Pa
Compressive Yield Strength	2,5E+08	Pa
Tensile Ultimate Strength	4,6E+08	Pa
Compressive Ultimate Strength	0	Pa

Figura 32: Propiedades del Steel Structural ANSYS

Si se analizan las propiedades del acero seleccionado, existe una gran proximidad con respecto a las características del acero normalizado, excepto el límite elástico o Yield Strength. Como el valor de esta propiedad se ve muy perjudicado y, sin embargo, las demás presentes están muy relacionadas con el Acero C45E, se tomará como valor límite de plastificación para el estudio el proporcionado por el acero normalizado, es decir,  $\sigma_e = 1200 \text{ MPa}$ . Los resultados más destacados resumen que la deformación horizontal que logra alcanzar la pinza expansible en contacto con la superficie cónica es de  $7,5 \text{ mm}$ . Para este desplazamiento horizontal la tensión de Von Mises resultante es igual a  $\cong 1,2 \text{ GPa}$ .

A continuación, se incluyen alguna figura representativa de los resultados finales obtenidos por el programa de cálculo.

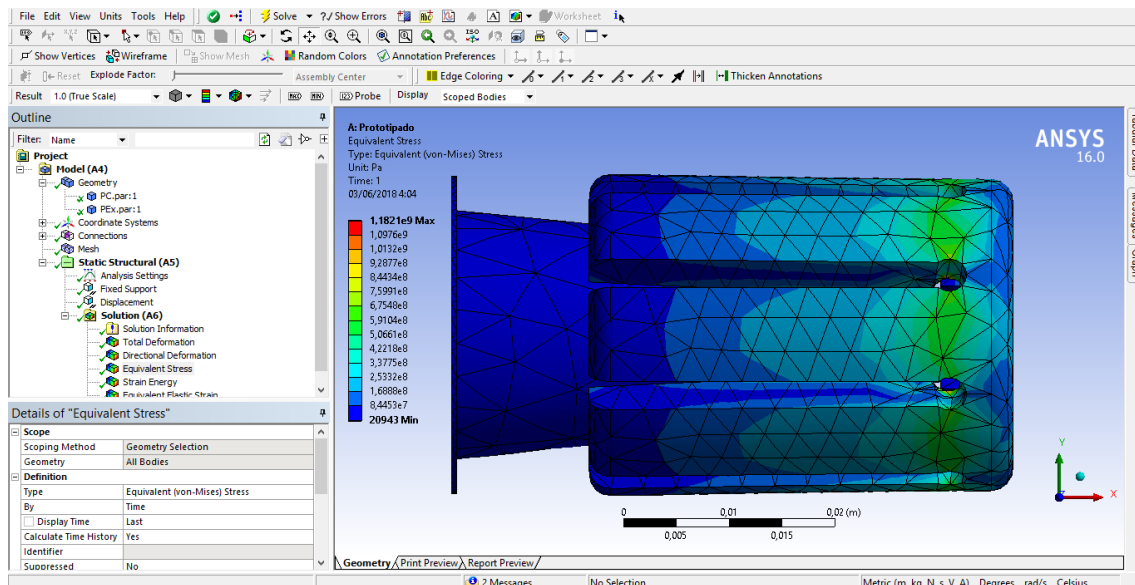


Figura 33: Tensiones de Von Mises para pieza de acero

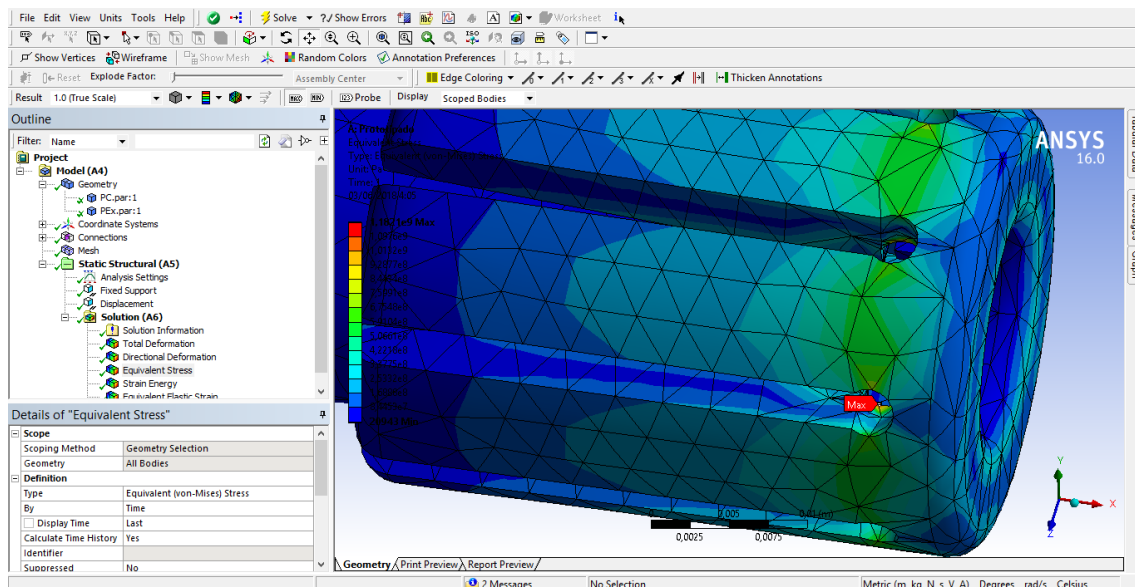


Figura 34: Representación del punto de concentración de tensiones en pieza de acero

La representación del desplazamiento horizontal es:

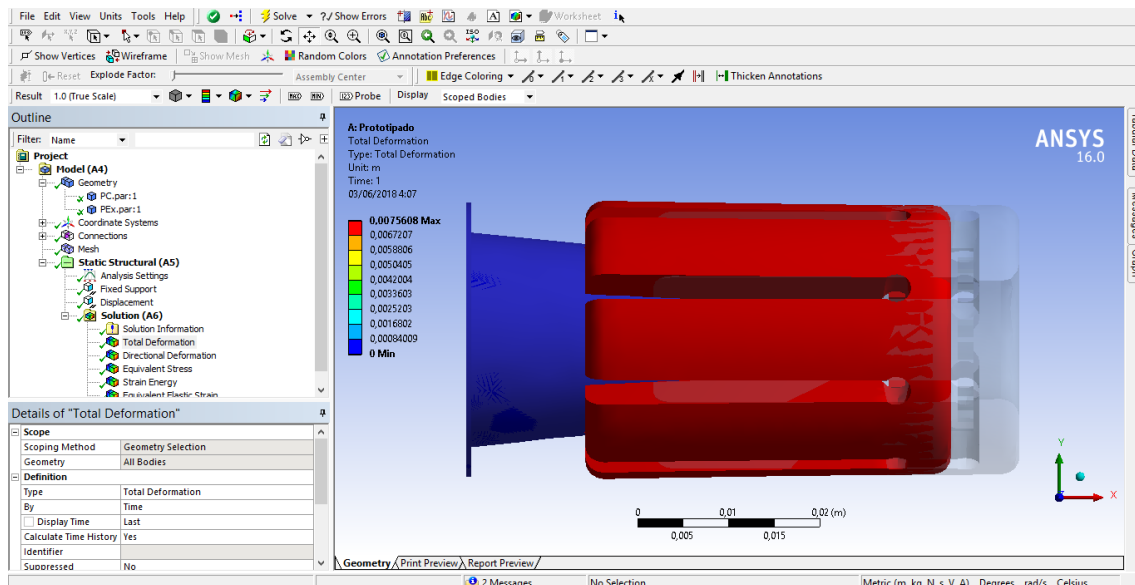


Figura 35: Diagrama de deformaciones para pieza de acero

Como objeción final, cabe destacar que durante este estudio existieron varios problemas de compilación que no permitían su correcta resolución. Estos obstáculos pueden deberse a errores de lectura del CAD de origen. Por este motivo se modificó la idea del estudio inicial para un contacto por fricción.

## 8.2. Estudio de contacto entre la pinza expansible y la pieza para mecanizar

En este análisis se pretende comprobar la interacción que existe entre la pinza expansible y la pieza que se desea mecanizar. En el siguiente modelo puede observarse el diseño de ambas piezas y la superficie donde se genera el contacto.

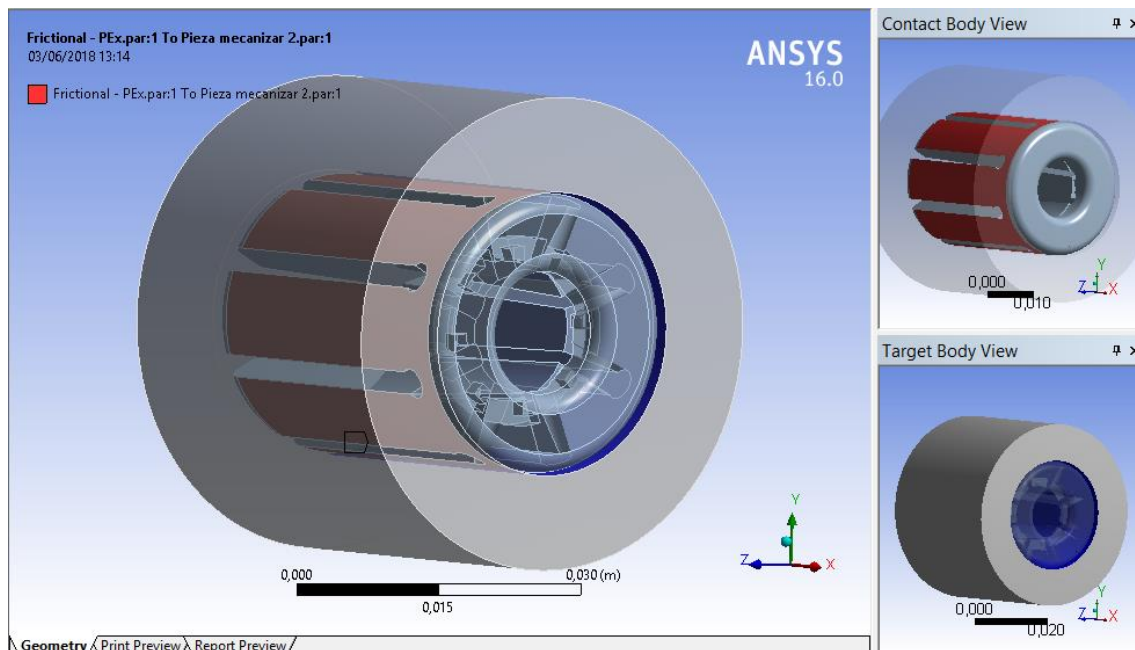


Figura 36: Representación del contacto entre pinza-pieza

El método para abordar el estudio de contacto se resume en describir la interacción de la pinza expansible y la pieza que se desea mecanizar compuesta por diferentes materiales. De este modo, este examen se realizará siguiendo cuatro ensayos principales para comparar la interacción entre los diferentes materiales. Los análisis entre los distintos materiales se clasifican en:

- Pinza en PLA y pieza en PLA.
- Pinza en PLA y pieza en acero.
- Pinza en Acero y pieza en acero.
- Pinza en Acero y pieza en PLA.

#### 8.2.1. Pinza en PLA y pieza en PLA

El siguiente estudio se efectúa una distribución de carga por toda la pinza expansible y divide la carga total entre las ocho partes de la pinza que se deforman para originar el contacto.

La fuerza inicial aplicada para realizar el análisis presenta el valor más desfavorable, es decir, representa el valor de la fuerza de amarre que impide el movimiento relativo entre la pinza expansible y la pieza que se desea mecanizar. En este caso se tomarán los valores geométricos concretos de una pieza para mecanizar.

La fuerza para el contacto plástico-plástico presenta un valor de:

$$F_{spz} = 262,815 \text{ N}$$

Y la fuerza aplicada en cada sección expansible de la pinza es:

$$F_{spz-u} = \frac{262,815}{8} \cong 33 \text{ N}$$

Con el presente resultado se estudió el impacto mecánico que ofrece el contacto ante la distribución de esta carga por las distintas secciones expansibles de la pinza. En la siguiente figura se muestra el rango de valores tensionales que sufre el conjunto analizado.

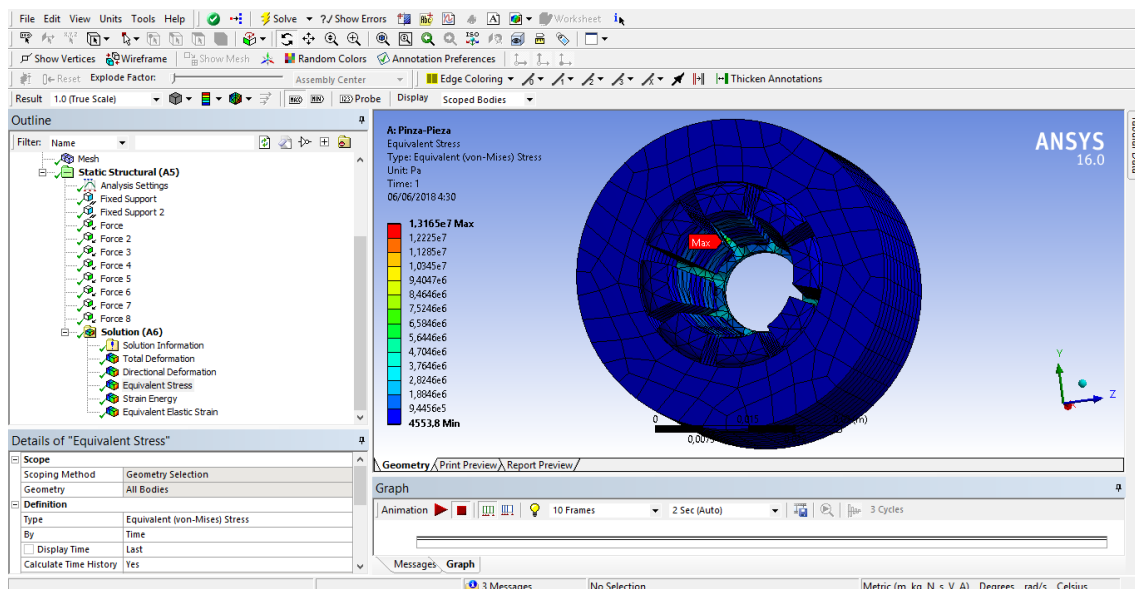


Figura 37: Diagrama de tensiones pinza plástica y pieza plástica

Se puede comprobar que no supera en ningún caso el límite elástico que proporciona el material plástico, en este caso, un material compuesto por ácido polilactico (PLA). El valor tensional que limita la plastificación para este compuesto es:

$$\sigma_{PLA} \cong 55 \text{ MPa}$$

Las deformaciones producidas en el modelo toman el siguiente rango de valores.



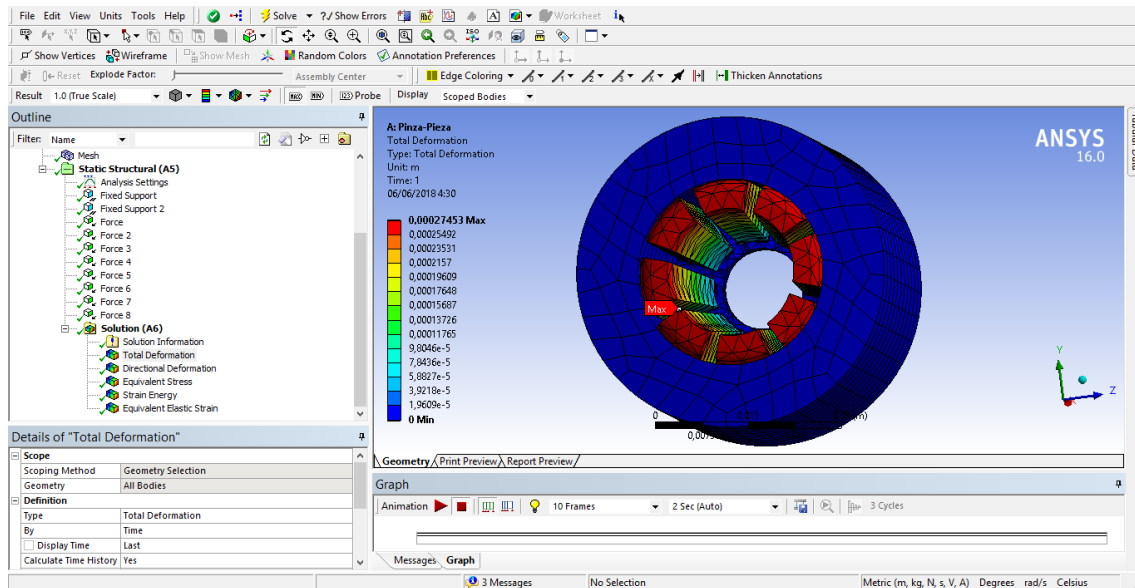


Figura 38: Diagrama de deformaciones pinza plástica y pieza plástica

La energía disipada en Julios durante el proceso expansible presenta una localización y un rango de valores dentro del diseño situados en torno a las siguientes secciones.

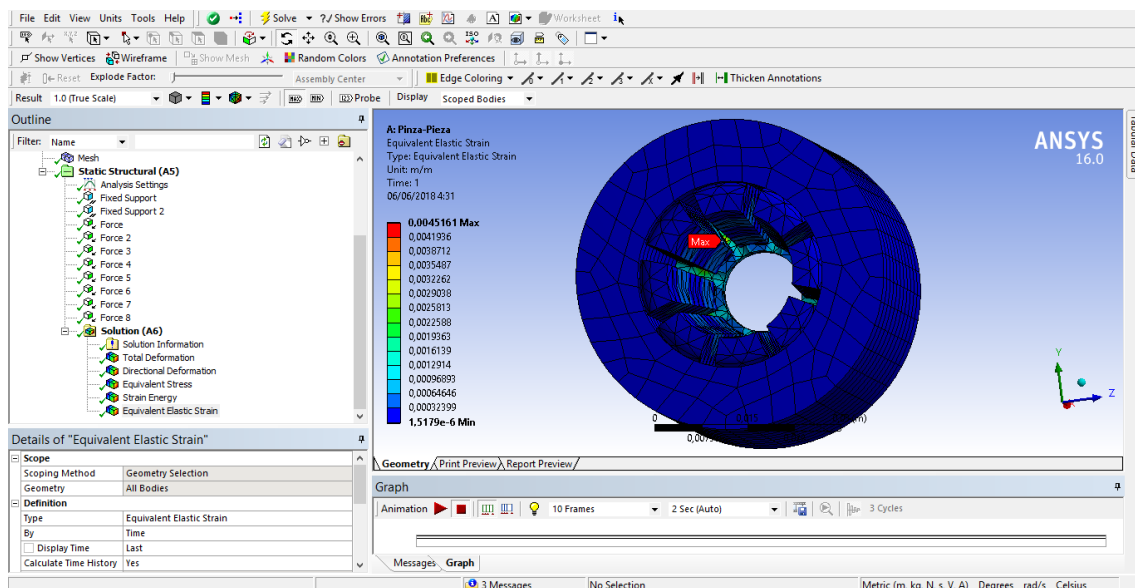


Figura 39: Diagrama disipación de energía pinza plástica y pieza plástica

### 8.2.2. Pinza en PLA y pieza en acero

En el siguiente diseño se propone una pinza fabricada en ácido poliláctico frente a una modelo que se requiere torneado fabricado en acero C45E. En el estudio de la interacción de fuerzas se debe prestar especial atención al comportamiento mecánico que sufre la



pieza elaborada en PLA, debido a que esta pieza sufrirá la mayor carga que asegura un contacto libre de movimientos relativos.

Tras realizar el estudio de fuerzas se estimaron una fuerza de amarre que asegura el contacto y la ausencia de desplazamientos igual a:

$$F_{spz} = 13,12 \text{ KN}$$

Si distribuimos esta fuerza entre las diferentes secciones expansibles de la pinza se obtiene que:

$$F_{spz-u} = \frac{13,12 \text{ KN}}{8} \cong 1,64 \text{ KN}$$

Tras realizar la compilación mediante Elementos Finitos se obtiene que la pinza plástica se encuentra dentro del régimen elástico y que no supera el límite elástico durante la aplicación de esta carga.

$$\sigma_{PLA} \cong 55 \text{ MPa}$$

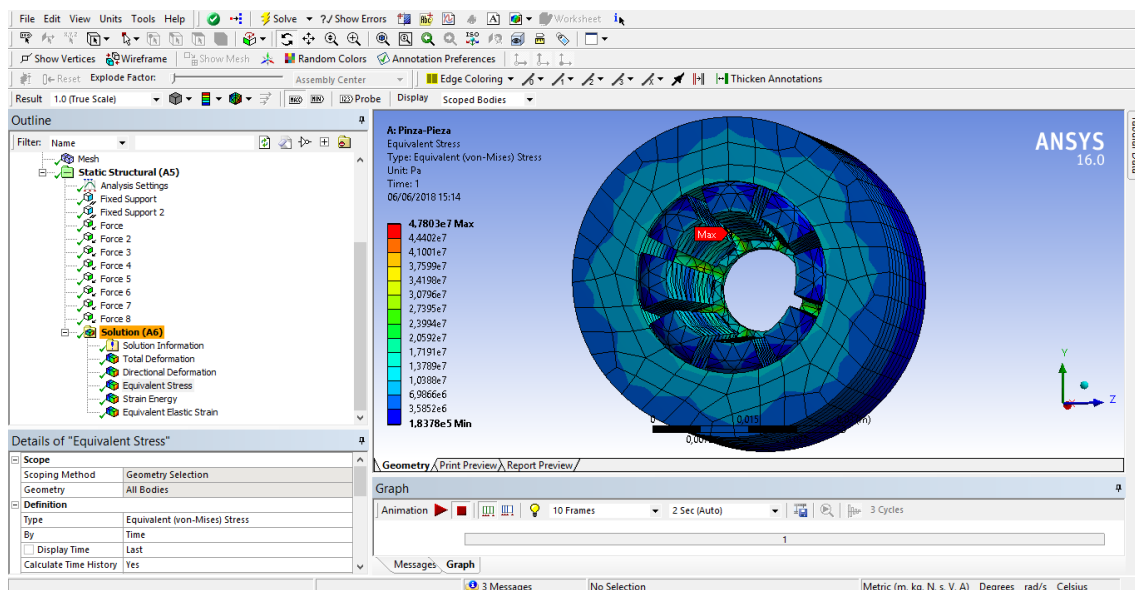


Figura 40: Diagrama de tensiones pinza plástica y pieza en acero

En las siguientes ilustraciones se muestran la distribución de la deformación y la energía disipada durante el proceso.

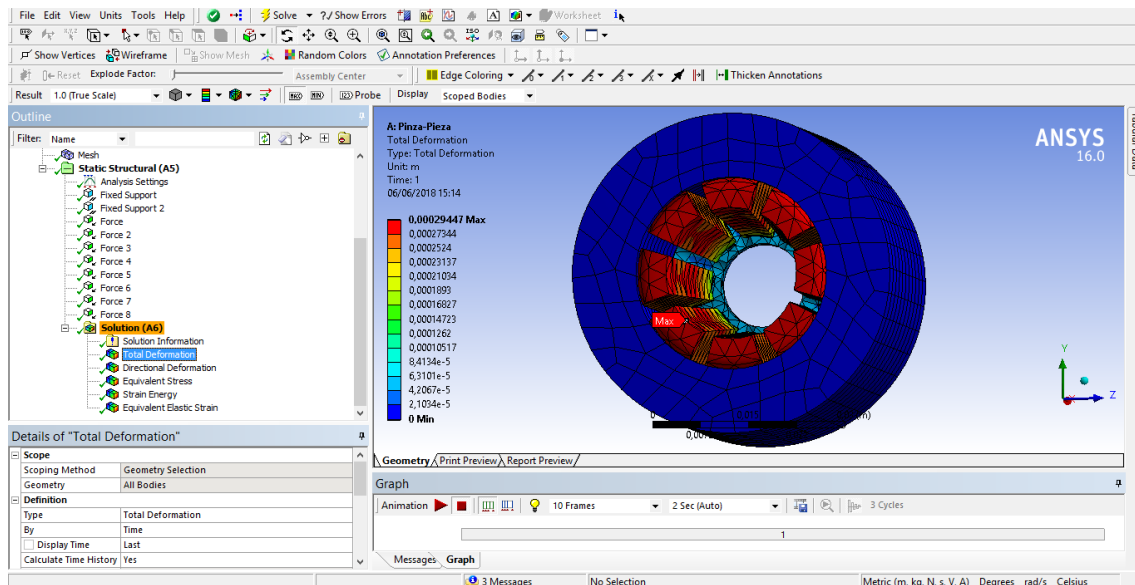


Figura 41: Diagrama de deformaciones pinza en acero y pieza plástica

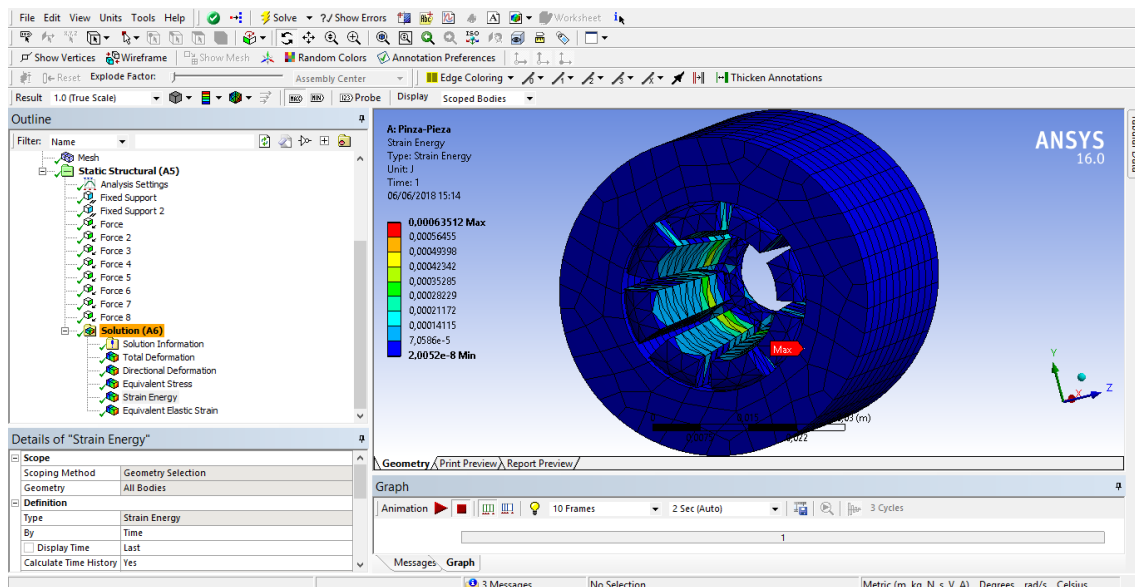


Figura 42: Diagrama disipación de energía pinza plástica y pieza en acero

### 8.2.3. Pinza en acero y pieza en acero

A continuación, se describe y representa el desarrollo teórico de la distribución de fuerzas para un conjunto diseñado únicamente en acero. Para abordar adecuadamente el análisis se debe recopilar los resultados obtenido en el estudio de fuerzas de amarre para una pinza fabricada en acero.

La fuerza de sujeción que asegura la ausencia de desplazamientos indeseados en el modelo de contacto es:

$$F_{spz} = 23,6 \text{ KN}$$

Si distribuimos esta fuerza entre las diferentes secciones expansibles de la pinza se obtiene que:

$$F_{spz-u} = \frac{23,6 \text{ KN}}{8} \cong 2,95 \text{ KN}$$

El resultado de los cálculos por Elementos Finitos aborda los resultados tensionales siguientes:

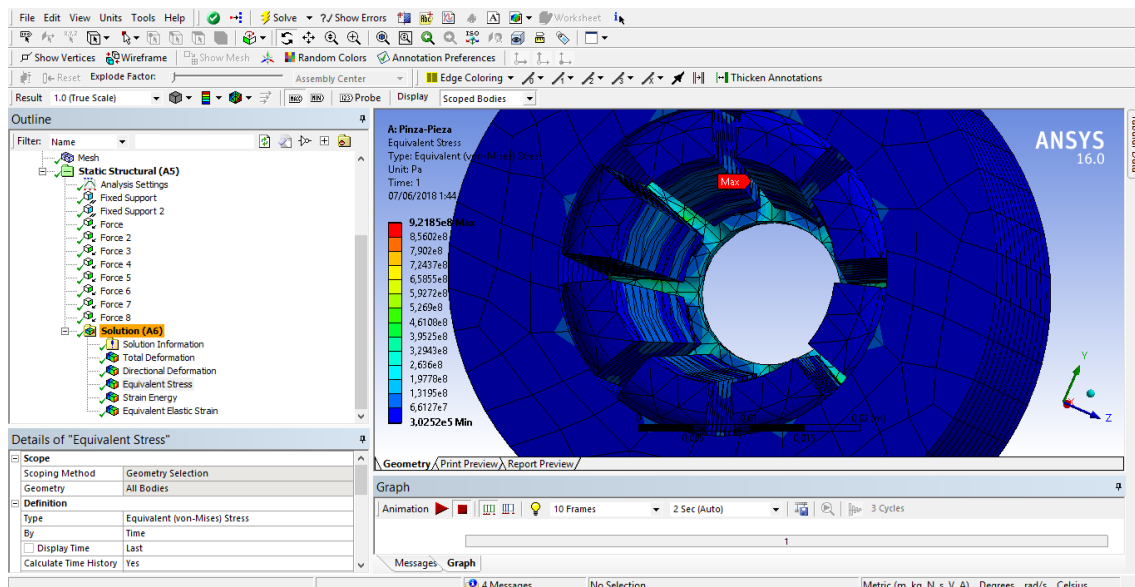


Figura 43: Diagrama de tensiones pinza en acero y pieza en acero

Se comprueba que no supera el límite elástico para aun acero C45E o F1140, dado a que el límite elástico de este compuesto altamente aleado es igual a:

$$\sigma_{C45E} \cong 1200 \text{ MPa}$$

En las siguientes ilustraciones se representa la deformación que sufre el modelo, así como la energía que disipa el experimento.

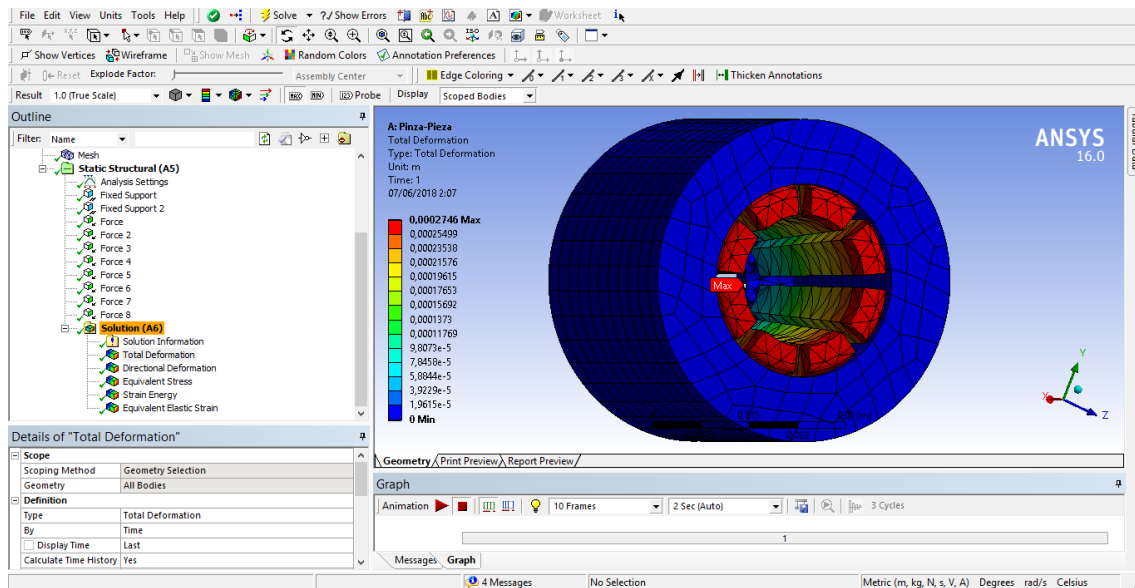


Figura 44: Diagrama de deformaciones pinza en acero y pieza en acero

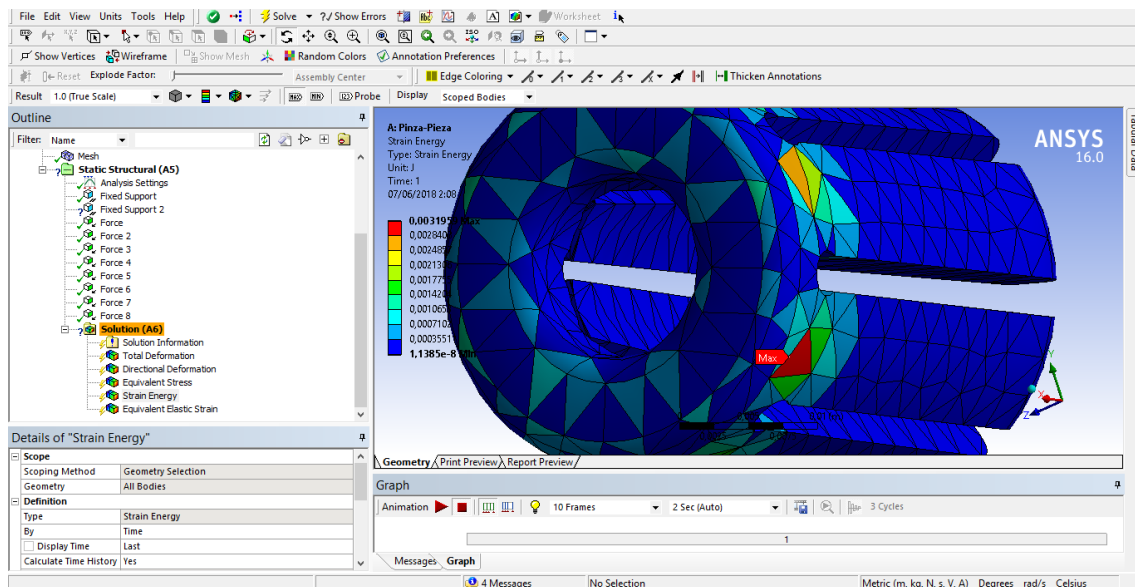


Figura 45: Diagrama disipación de energía pinza en acero y pieza en acero

#### 8.2.4. Pinza en acero y pieza en PLA

Finalmente, se concluye el análisis de contacto no lineal entre la pinza expansible y el diseño de modelo geoméricamente determinado que se requiere mecanizar. Cabe recordar que la pinza estará fabricada en un acero C45E y la pieza en PLA.

El estudio de esfuerzos previo destaca que la fuerza de amarre que aseguro el contacto sin deslizamientos entre estos materiales es:

$$F_{spz} = 206,07 \text{ N}$$

$$F_{spz-u} = \frac{206,07 \text{ N}}{8} \cong 26 \text{ N}$$

El análisis revela y asegura que no se supera el límite elástico en ninguno de los materiales integrados. En las siguientes ilustraciones se comprueba tanto la distribución tensional, de deformaciones y de disipación energética.

$$\sigma_{C45E} \cong 1200 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{PLA} \cong 55 \text{ MPa}$$

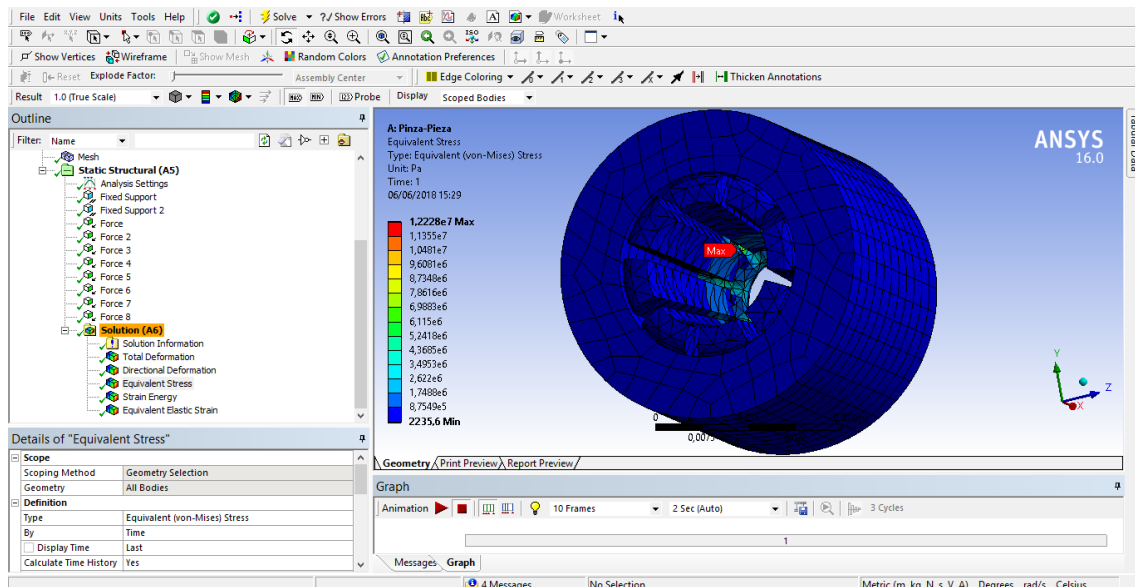


Figura 46: Diagrama de tensiones pinza acero y pieza plástica

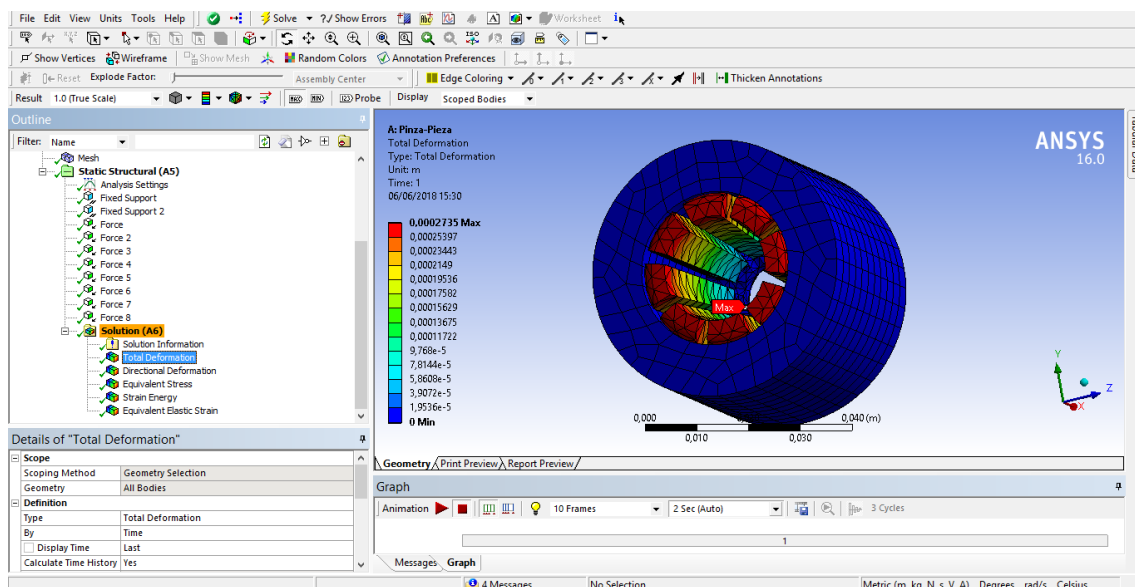


Figura 47: Diagrama de deformaciones pinza en acero y pieza plástica

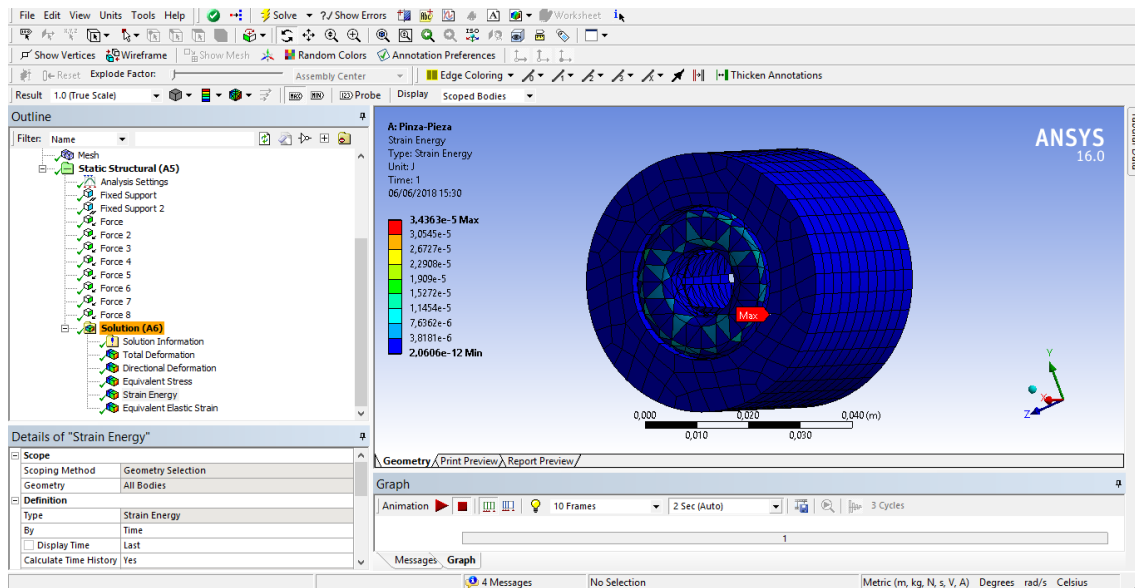


Figura 48: Diagrama disipación de energía pinza en acero y pieza plástica

## 9. Fabricación mediante deposición fundida de bajo coste

### 9.1. Selección del modelo de fabricación

La idea principal de fabricación del mandrino de sujeción de piezas por expansión surge de un catálogo de la empresa Hainbuch en el año 2016/17. Dentro de este catálogo, en la parte de “Special Segmented Mandrels” se selecciona un modelo similar al “Type 213<sup>7</sup>”.

El diseño propuesto para la impresión, una vez estudiado detalladamente el modelo del mandril especial Tipo 213 es el siguiente.

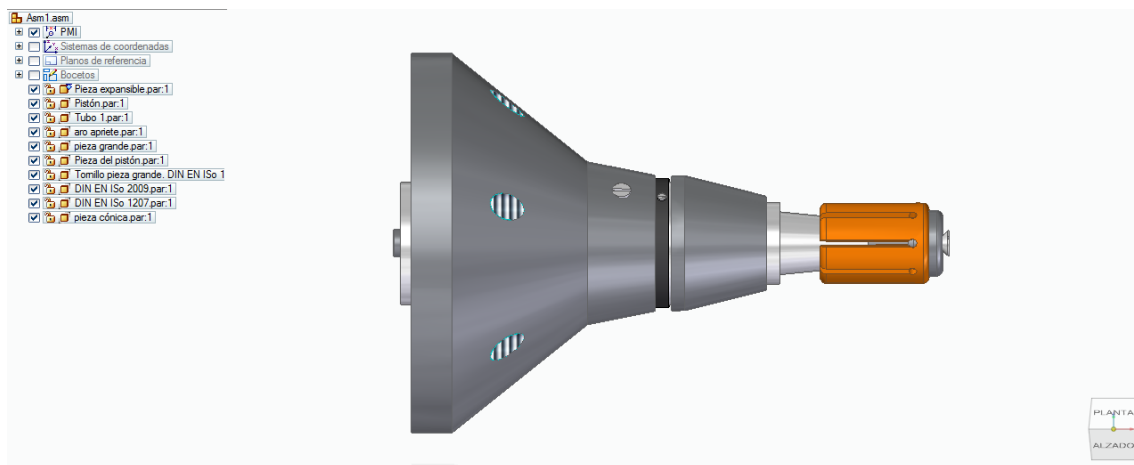


Figura 49: Vista I prototipado mandril 1

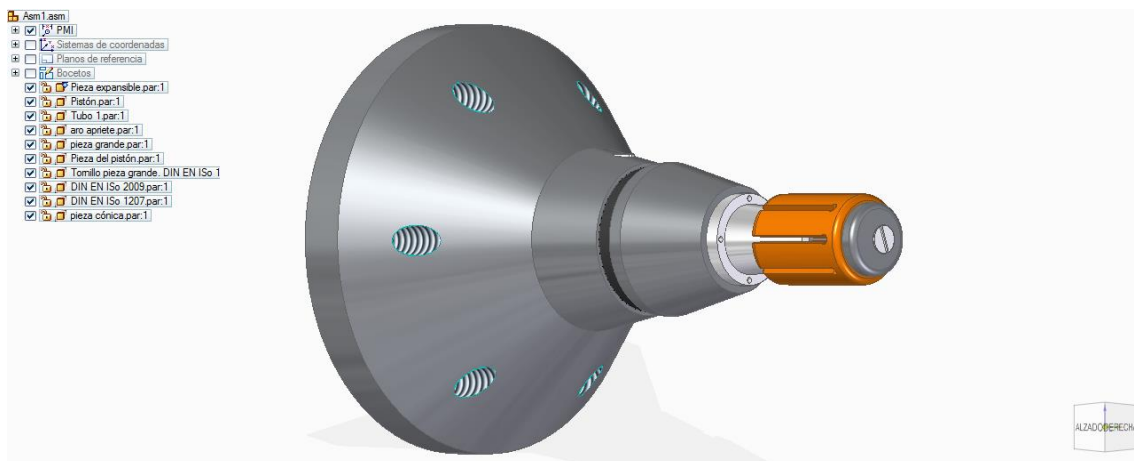
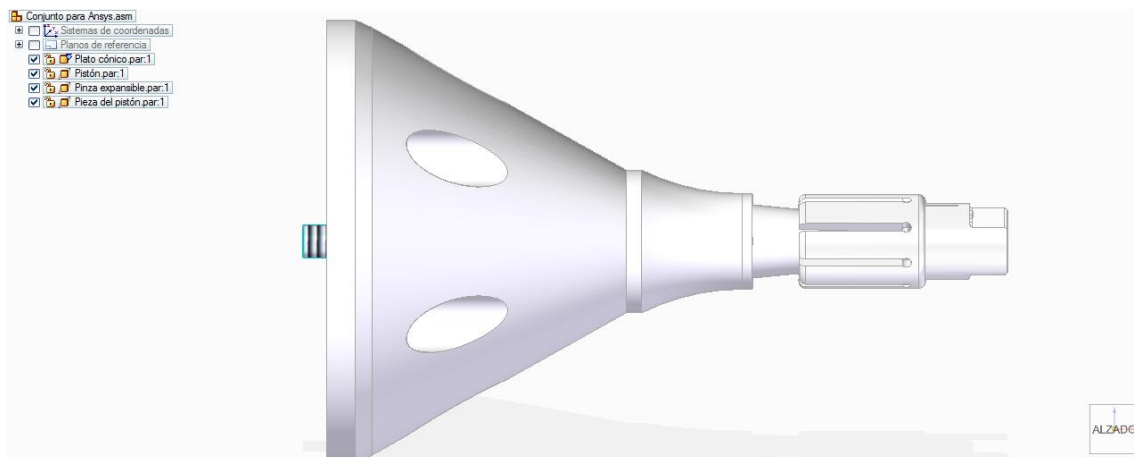


Figura 50: Vista II prototipado mandril 1

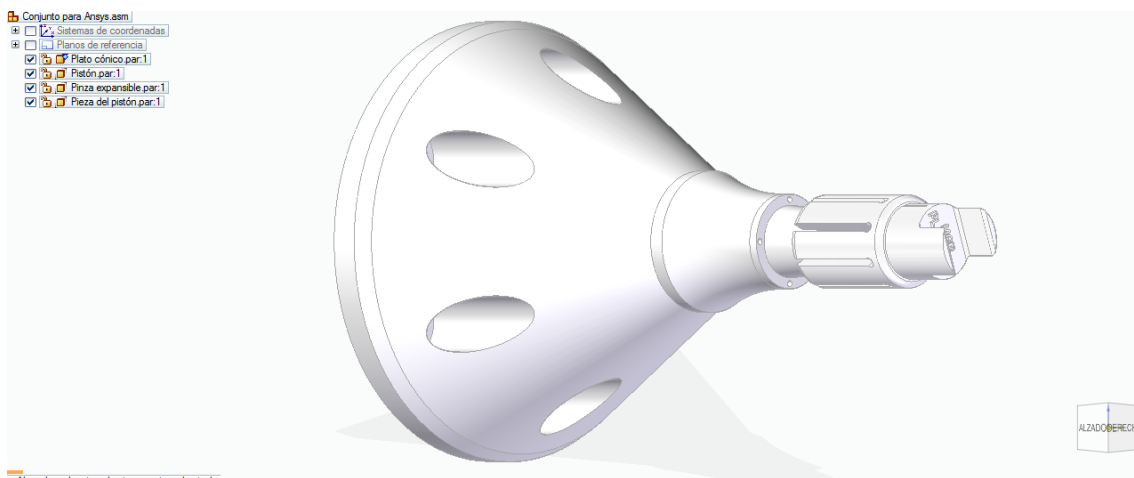
<sup>7</sup> Consultar Anexo VI para observar el catálogo de Hainbuch 2016/17, Special Segmented Mandrels, Type 213.

Sin embargo, para la fabricación se va a utilizar un material plástico, el ácido poliláctico, también conocido como el PLA, y la incorporación de tornillos en el mandril supone un problema. Este impedimento reside principalmente en el factor tan importante que presentan el uso de tornillos en esta pieza, pues son los responsables de soportar unos elevados esfuerzos de tracción, compresión, flexión y torsión entre otras. Si se realizan estos tornillos en material plástico se corre el riesgo de alcanzar muy rápidamente al límite elástico del material plástico empleado para la fabricación y, por consiguiente, surge una deformación plástica o incluso rotura que impide el correcto funcionamiento del mismo.

Por este motivo, se indagó en un diseño donde se redujeran, dentro de lo posible, cualquier tipo de unión atornillada. El diseño resultante de este estudio puede observarse en la siguiente ilustración.



*Figura 51: Vista I prototipado mandril 2*



*Figura 52: Vista II prototipado mandril 2*





Figura 53: Plano despiece prototipado mandril 2

La tabla de especificaciones técnicas inicial para el diseño del prototipo de mandrino de sujeción por expansión fabricado en un compuesto plástico denominado ácido poliláctico (PLA).

	Masa ( <i>kg</i> )	Volumen ( $mm^3$ )	Área de superficie ( $mm^2$ )	Densidad del material ( $kg/mm^3$ )
<b>Pieza cónica grande</b>	0,091	73209,648	73921,96	1240
<b>Pieza cónica pequeña</b>	0,014	11622,084	10170,89	1240
<b>Pieza del pistón</b>	0,008	6086,516	3516,61	1240
<b>Pinza expansible</b>	0,018	14306,551	9147,40	1240
<b>Pistón</b>	0,021	16776,663	7163,53	1240

<b>Plato cónico</b>	0,922	755453,420	73833,48	1240
<b>Total</b>	1,074	871368,798	177819,87	-

*Tabla 6: Especificaciones técnicas Prototipado Mandril 2*

El siguiente paso fue adaptar el modelo de mandrino a un volumen de impresión restringido, que estará limitado por el uso de la impresora 3D seleccionada. En este caso se han valorado las posibilidades que ofrece una impresora 3D llamada Prusa I3 Ephetos<sup>8</sup>. Por esta razón se redujeron las medidas tanto del plato cónico como del pistón para favorecer las condiciones de impresión.

Para entender mejor algunos factores que condicionan la impresión se puede estudiar un ejemplo simple. Este ejemplo está relacionado con la impresión del pistón. El pistón presentaba una medida inicial de 207,5 mm, y, aunque esta medida podría estar dentro de las que proporciona la impresora, no era recomendable imprimirlo de forma horizontal, debido a que la creación de estructuras para la sustentación del material impediría que el pistón fuera un cilindro perfecto. Por este motivo, se tomó la decisión de imprimirlo de forma vertical, para favorecer la perfección cilíndrica propia del pistón. Así, el pistón pasó a tomar una medida longitudinal de 179,5 mm, donde se tiene en cuenta un error de 0,5 mm, debido a que la máxima longitud de impresión vertical es de 180 mm.

En las siguientes ilustraciones se puede observar mediante Rayos X la formación de estructuras de sustentación del material si se hubiera decidido imprimir el pistón de forma horizontal.

---

<sup>8</sup> ANEXO II, op. cit., p. 15

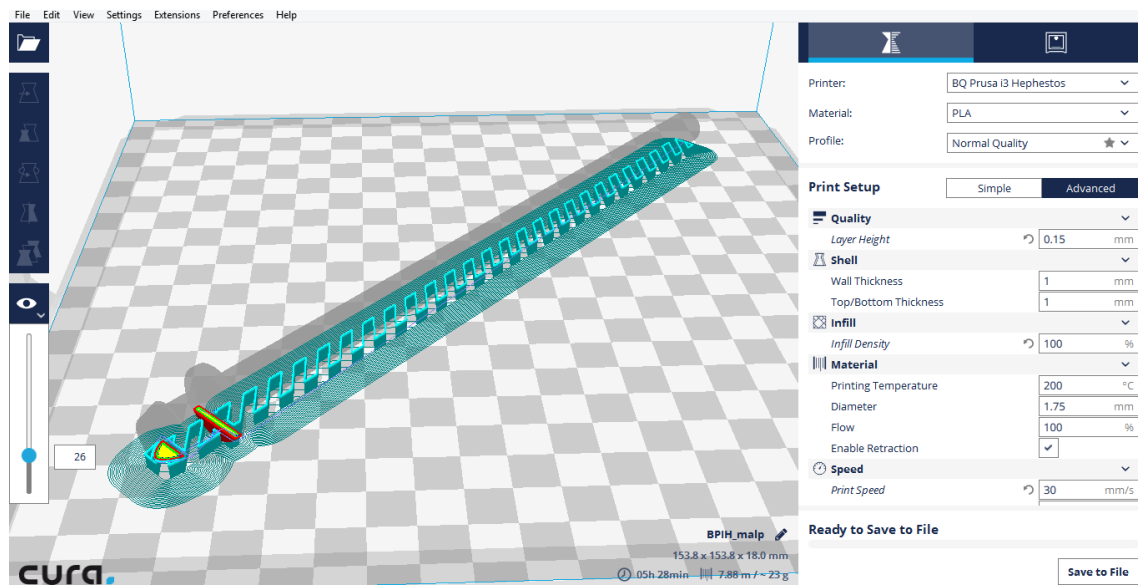


Figura 54: Vista I con rayos X de estructura de sustentación de piezas

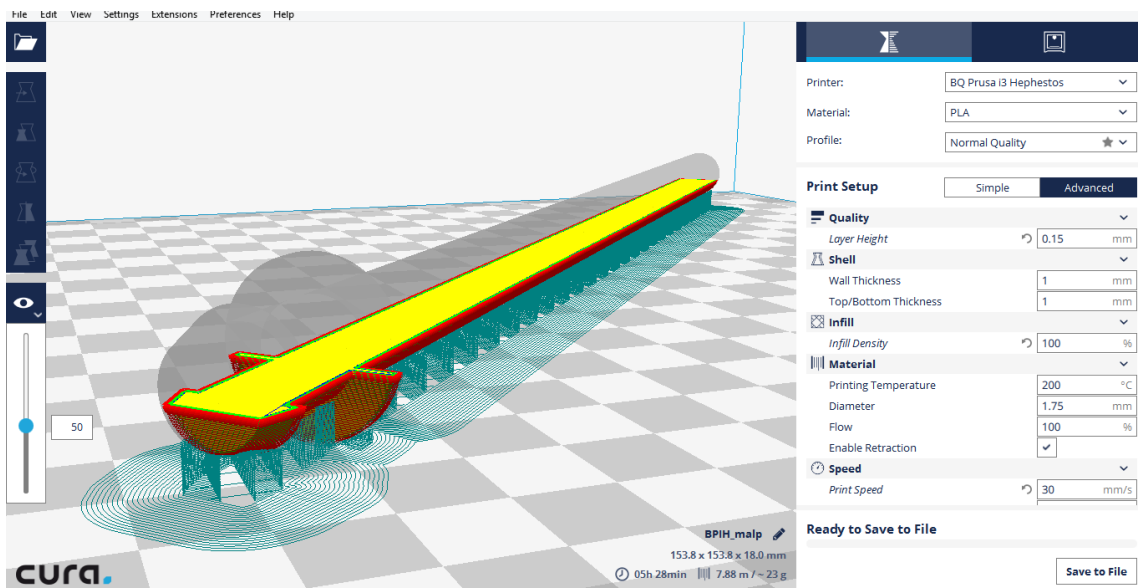


Figura 55: Vista II con rayos X de estructura de sustentación de piezas

Finalmente, el modelo final desarrollado que se adaptará a los parámetros de impresión y que cumple con el objetivo del mandrino es el siguiente.

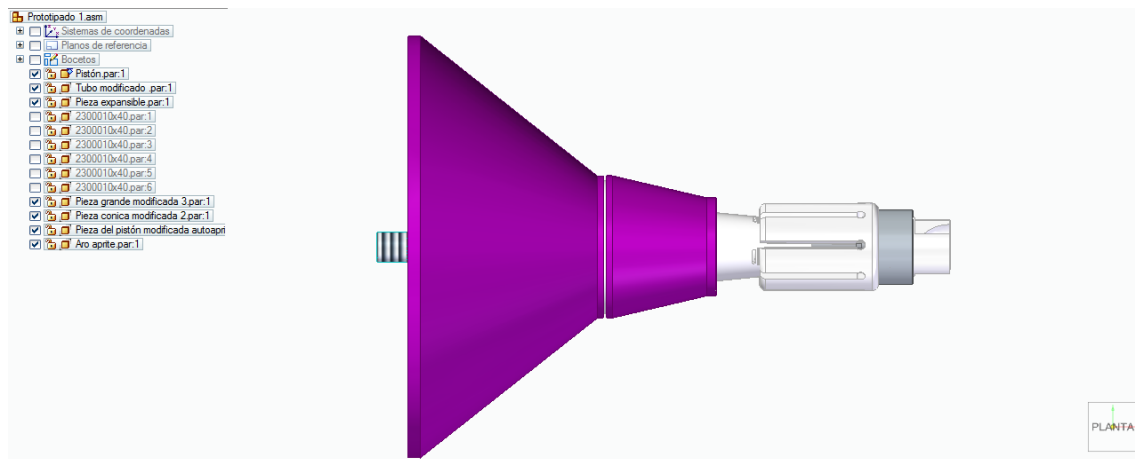


Figura 56: Vista I prototipado mandril final

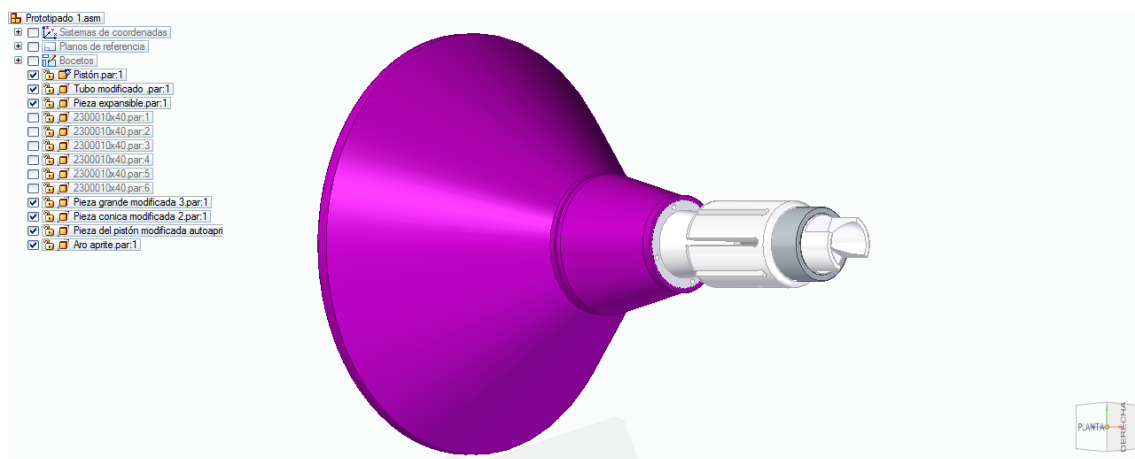


Figura 57: Vista II prototipado mandril final

Posteriormente se indagará sobre el motivo de diseño de cada componente y también se explicará la mecánica de montaje.

La tabla de especificaciones técnicas para el diseño final del prototipado de mandrino de sujeción de piezas por expansión fabricado en ácido poliláctico (PLA) es esta:

	Masa ( <i>kg</i> )	Volumen ( <i>mm</i> <sup>3</sup> )	Área de superficie ( <i>mm</i> <sup>2</sup> )	Densidad del material ( <i>kg/mm</i> <sup>3</sup> )
Aro de apriete	0,002	1558,369	2188,25	1240 al 100 %

<b>Carcasa cónica grande</b>	0,036	29403,427	50022,86	1240 al 100 %
<b>Carcasa cónica pequeña</b>	0,008	6677,496	9562,57	1240 al 100 %
<b>Pieza del pistón</b>	0,005	3819,666	2829,01	1240 al 100 %
<b>Pinza expansible</b>	Valor teórico 0,018  Valor real 0,009	14341,379	9137,32	1240 al 50 %
<b>Pistón</b>	Valor teórico 0,018  Valor real 0,016	14422,166	6169,08	1240 al 90 %
<b>Plato cónico</b>	Valor teórico 0,625  Valor real 0,094	503792,846	63833,48	1240 al 15 %
<b>Total</b>	0,712	574015,343	143742,57	

*Tabla 7: Especificaciones técnicas Prototipado Mandril Final*

El porcentaje de densidad indica el tanto por ciento al que ha sido imprimido cada pieza, por lo que existe una variación en la masa. Como se indica, los valores subrayados en

amarillo son los valores ideales para porcentajes de densidad de material al 100 %, y los valores reales están por debajo, en el caso en el que se hayan empleado densidades inferiores.

## 9.2. Análisis detallado del diseño del modelo final

En el diseño final se han tenido en cuenta varios factores que se describen a continuación.

Uno de los elementos que se han tenido en cuenta es el efecto cuña, permite que la pinza expansible se mantenga expandida una vez que se haya accionado mediante el pistón. Esto se debe principalmente al rozamiento entre la pinza y el plato cónico gracias a que el ángulo de expansión es menor o igual a  $5^\circ$ .

Otro detalle puede observarse en los pequeños orificios presente en dos partes diferenciadas del plato cónico. La misión de estas cavidades es transportar un flujo de aire constante. Los orificios presentes en la parte cónica de plato sirven para indicar en qué momento está listo el mandrino para que comience el giro. Mientras, los que se sitúan en la cara circular sirven como sistema de seguridad en caso de que se supere el límite elástico de la pieza, si existe una rotura o fallo, o si no se origine contacto entre la pinza expansible y el material a mecanizar.

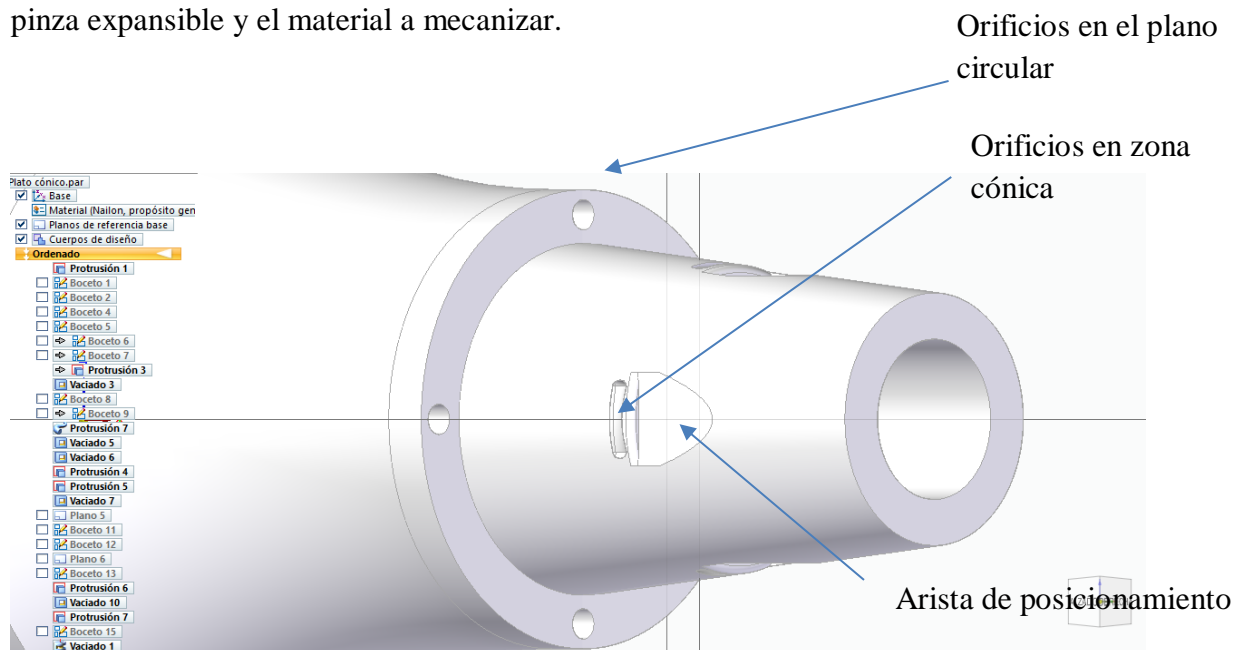


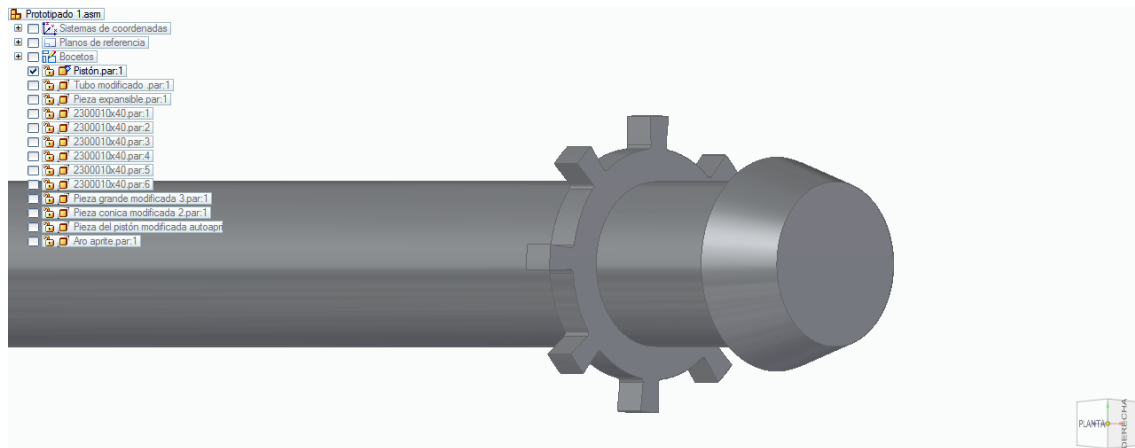
Figura 58: Vista detalle de orificios en el plato cónico

Las aristas de posicionamiento permiten situar adecuadamente la pinza expansible para que cuando actúe obstruya los orificios de salida de aire que se encuentran en la parte cónica. Este posicionamiento mediante sensor neumático corresponde a la patente ES2413910

Una curiosidad de diseño es el sistema de amarre del pistón, compuesto por una pieza que permite su amarre y otra que asegura que la anterior no se desprenda. Estas piezas hacen referencia a la pieza del pistón y al aro de apriete.

El conjunto presenta una forma cónica que favorece un aprovechamiento de material y asegura una correcta unión mediante tornillos a la nariz de husillo del torno al que se desee instalar.

El pistón presenta, cerca de uno de los extremos, una disposición similar a un engranaje. Este diseño permite atravesar la pinza expansible y llegar hasta un límite. Una vez que el pistón llega a este límite, se gira hacia un lado y estos engranajes encajan interiormente con la pinza expansible hasta llegar hasta otro tope. El objetivo es impedir el desplazamiento inicial transversal de la pinza expansible sobre el pistón.



*Figura 59: Vista detalle del pistón*

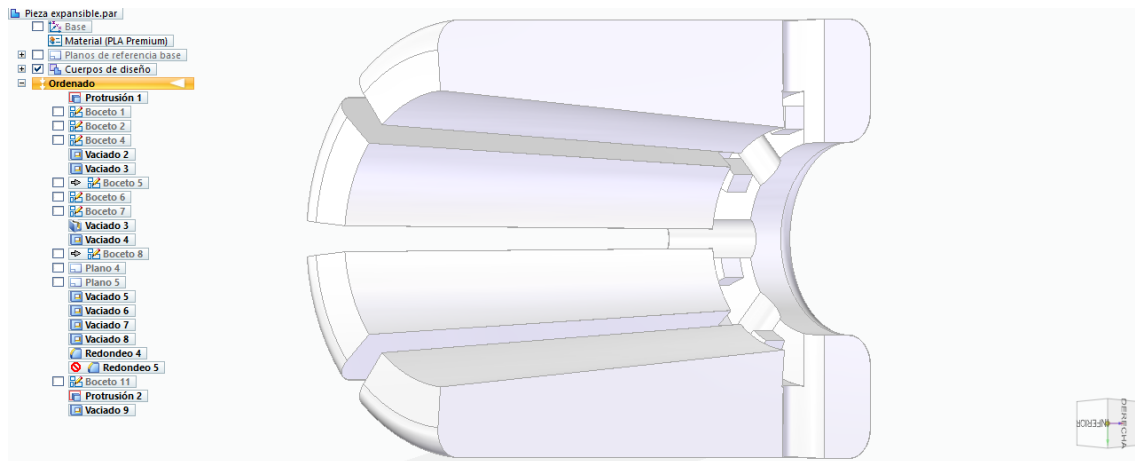


Figura 60: Vista detalle de la pinza expansible

También existe en uno de los extremos del pistón una geometría cónica en la que se amarra dos piezas anteriormente descritas. El objetivo de este diseño es que todo el esfuerzo axial que ofrece el pistón a la pinza expansible se distribuya mediante el uso de estas piezas sobre la cara posterior de la pinza.

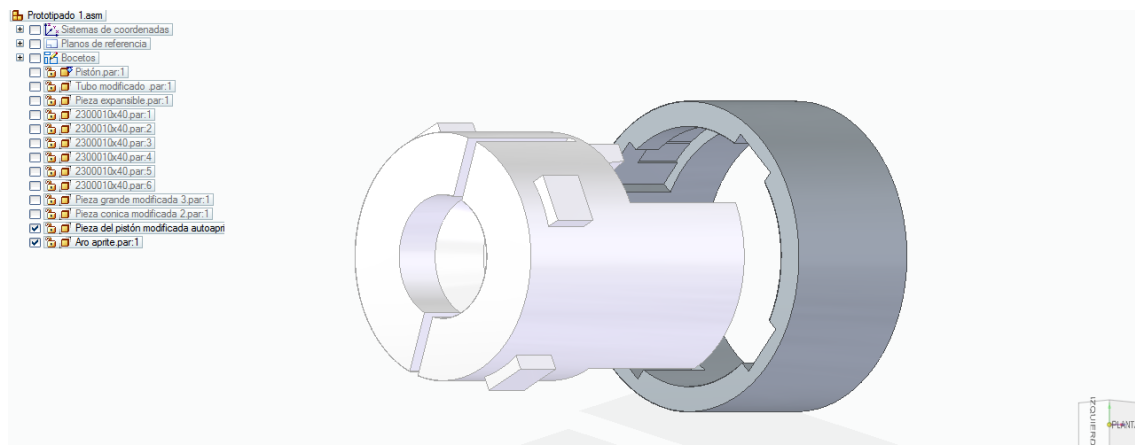


Figura 61: Vista detalle sistema de amarre del pistón

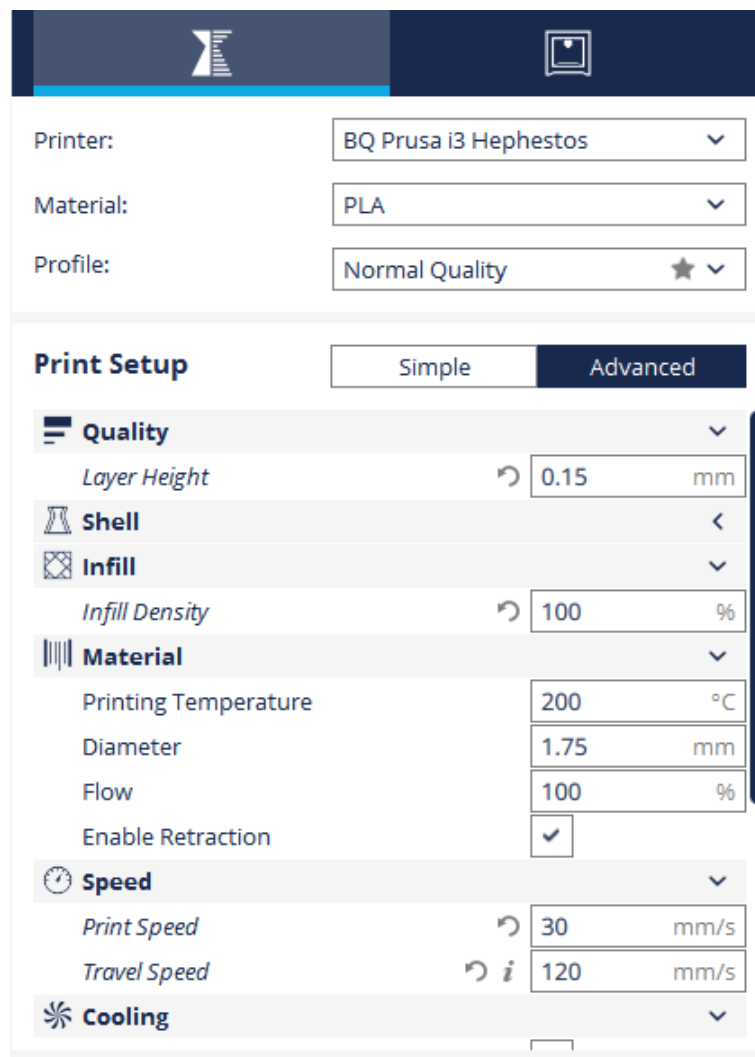
### 9.3. Detalles de impresión

La herramienta que se ha utilizado para generar el código que interpreta la impresora 3D (.gcode) es un programa de versión gratuito de la empresa Ultimaker denominado Cura. Mediante este programa se pueden modificar una gran cantidad de factores que repercuten directamente en la impresión.



A continuación, se van a describir algunos de las cuestiones claves del programa. El estudio de estos aspectos ha sido determinante a la hora de obtener unas piezas de una calidad óptima.

- *Layer Height*. Hacer referencia a la altura entre las deposiciones de material.
- *Infill Density*. Densidad de la pieza.
- *Print Temperature*. Temperatura de salida del material, temperatura del extrusor.
- *Print Speed*. Velocidad de movimiento.
- *Travel Speed*. Velocidad de movimiento inicial de capa.



The screenshot shows the Cura software interface. At the top, there are three dropdown menus: 'Printer:' set to 'BQ Prusa i3 Hephestos', 'Material:' set to 'PLA', and 'Profile:' set to 'Normal Quality'. Below these is the 'Print Setup' section, which has two tabs: 'Simple' and 'Advanced'. The 'Advanced' tab is selected. The settings are organized into several expandable sections:

- Quality**: Includes 'Layer Height' set to 0.15 mm.
- Shell**: A section for shell settings.
- Infill**: Includes 'Infill Density' set to 100%.
- Material**: Includes 'Printing Temperature' (200 °C), 'Diameter' (1.75 mm), 'Flow' (100%), and 'Enable Retraction' (checked).
- Speed**: Includes 'Print Speed' (30 mm/s) and 'Travel Speed' (120 mm/s).
- Cooling**: A section for cooling settings.

Figura 62: Propiedades de impresión en programa Cura

Lo recomendable es utilizar los parámetros de mayor calidad, sin embargo, la duración se incrementa notablemente, y al no disponer del tiempo necesario para realizar los

ensayos pertinentes se tuvo que seleccionar un equilibrio entre la calidad y el tiempo empleado.

Para encontrar el equilibrio entre calidad y tiempo se hizo uso de la ficha de las características técnicas que nos proporciona el fabricante del PLA<sup>9</sup>. Cabe destacar que, durante el proyecto, el fabricante de PLA cambio la ficha de las características técnicas del producto.

Alguna de las conclusiones a las que se llegaron tras algún ensayo fueron las siguientes:

- La temperatura de impresión más óptima es de 200 °C, debido a que se observaban alguna imperfección superficial más con otras temperaturas.
- La altura de capa óptima es de 0,15 *mm*, aunque cuanto menor sea esta más calidad va a presentar.
- Con respecto a la velocidad de impresión la óptima es de unos 30 *mm/s* debido a que menos velocidad no es recomendable por el fabricante.
- La densidad cuanto mayor sea mejor será la pieza final, en este aspecto solo interviene el tiempo disponible de impresión.

#### **9.4. Mecánica de montaje**

En este apartado se presentarán los pasos necesarios a seguir para el montaje y desmontaje adecuado el prototipo diseñado.

Para el montaje adecuado lo primero será unir mediante tornillos de allen cilíndricos de referencia 2300010x40 (normalizados por DIN 912 o ISO 4762<sup>10</sup>) la pieza designada como plato cónico a la nariz de husillo. Esta pieza puede atornillarse directamente si el torno lo permite o, por el contrario, que es lo más usual, se deberá disponer de un plato adaptador para la nariz de husillo correspondiente. La descripción de esta adaptación esta reglado por la norma UNE-ISO 702-1:2011.

Seguidamente, se procede a introducir el pistón mediante el que se accionará la retracción y su consecuente expansión de la pinza expansible. El pistón presenta unas medidas de 10 *mm* de diámetro, y de 179,5 *mm* de longitud, al igual que ocurre con el

---

<sup>9</sup> Consultar ANEXO VII para observar la ficha de características técnicas del PLA empleado para la impresión.

<sup>10</sup> Consultar ANEXO VIII para observar la normalización de tornillo allen cilíndrico.

plato cónico pueden fabricarse placas cilíndricas adaptadoras para las condiciones geométricas de cada torno.

En este instante se tienen dispuestos adecuadamente en el torno tanto el plato cónico y el pistón que lo atraviesa. El siguiente paso es introducir las carcassas protectoras si se dispone de ellas. Simplemente cumplen una función de protección para el dispositivo.

A continuación, se introduce la pinza expansible y finalmente las piezas que permiten el amarre del pistón para asegurar una distribución de fuerza lineal sobre la pinza. Las geometrías de las piezas han sido descritas en profundidad en el apartado del análisis detallado del diseño del modelo final.

Finalmente, se introduce la pieza que se desea a mecanizar para que el pistón accione la pinza de que la sujetará. Una vez que estén activados los sensores y de la orden de que todo está colocado correctamente, se introduce el giro deseado a conjunto que permitirá el mecanizado mediante el uso de herramientas de filo.

Para el desmontaje del mandrino se procede a retirar las piezas que originan el esfuerzo sobre la pinza y que a su vez amarran el pistón. Tras este proceso, se retira la pinza expansible girándola y extrayéndola aplicando una carga lineal en dirección horizontal. Y si se desea retirar el dispositivo por completo, se procede a disociar la conexión del pistón para extraerlo. Seguidamente se retiran las carcassas protectoras para acceder al atornillado del plato. Y para finalizar, se desenroscan los tornillos.

### **9.5. Pinzas expansibles**

El prototipo de pinza expansible cuenta con un diámetro exterior de  $29,5\text{ mm}$ , este diámetro ofrece una flexibilidad para sujeción de piezas que se encuentra entre los valores de  $30 - 32,3\text{ mm}$ . Sin embargo, este rango de flexibilidad no es suficiente. Se ha buscado mejorar la flexibilidad de este dispositivo, por lo que se han diseñado dos pinzas expansibles con una pequeña variación geométrica que repercute principalmente al diámetro exterior.

En primer lugar, se ha diseñado una pinza expansible de diámetro exterior de  $24,5\text{ mm}$ , por lo que ofrece un rango de perfiles de piezas para mecanizar entre  $25 - 27,3\text{ mm}$ .

También se ha incorporado una pinza expansible para piezas de mayor tamaño con un diámetro exterior de 34,5 mm, para sujeción de piezas de un diámetro interior entre 35 – 37,3 mm.

En la siguiente ilustración pueden observarse los distintos tamaños de pinzas expansibles.

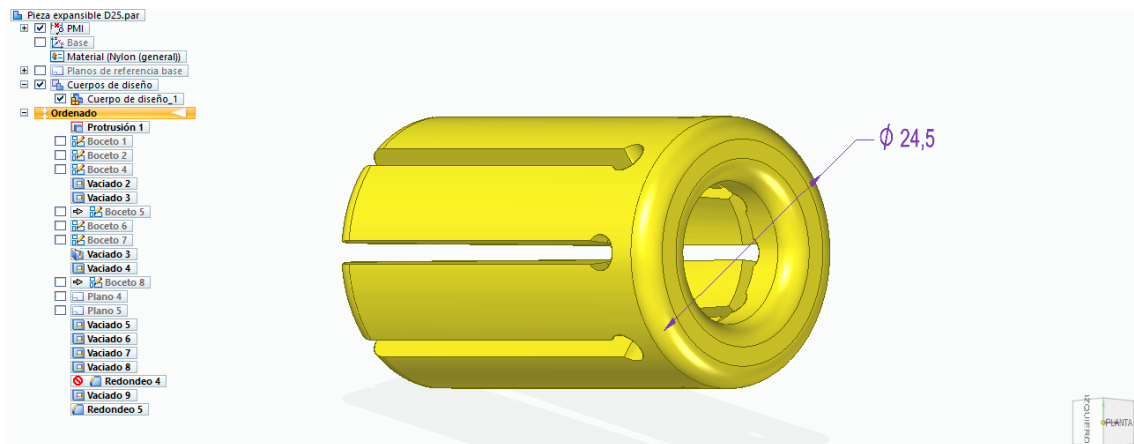


Figura 63: Pinza expansible D25

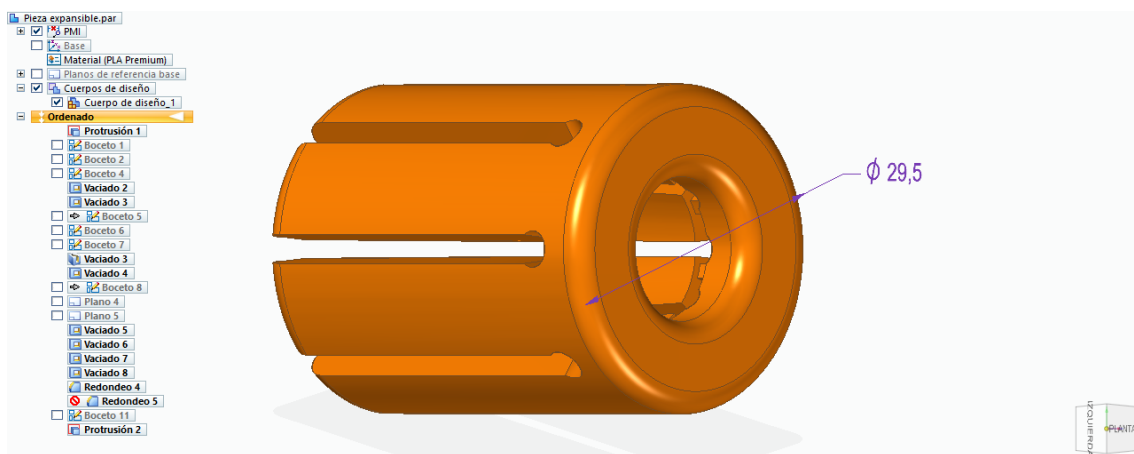


Figura 64: Pinza expansible D30

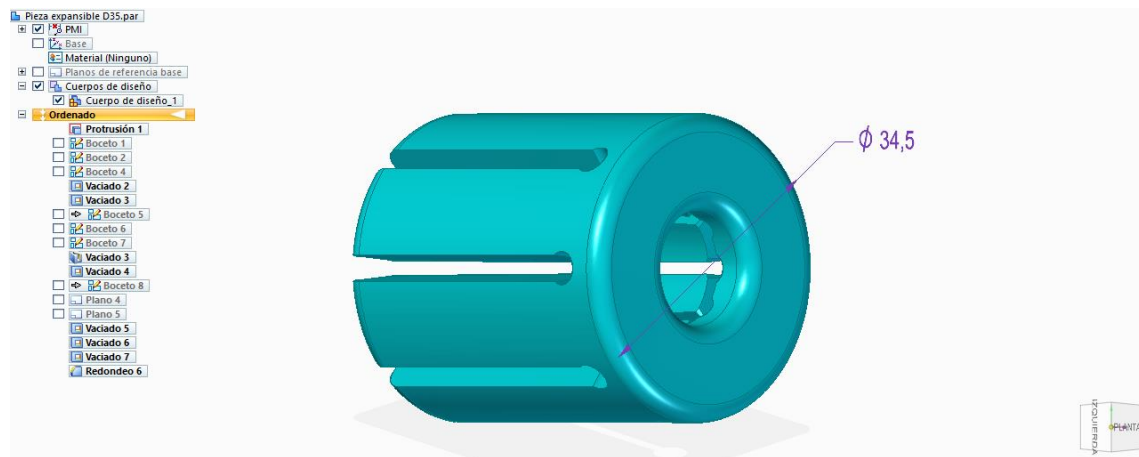


Figura 65: Pinza expansible D35

## 10. Presupuestos

La elaboración de un modelo de presupuestos que cuantifique los costes generados en el desarrollo del proyecto es fundamental para fijar los límites del estudio. En este apartado se realizará un análisis de costes que abordará los costes directos o de fabricación y los costes indirectos o generales.

Los costes directos hacen referencia a conceptos que repercuten directamente sobre la fabricación del producto. Los costes indirectos son aquellos cuya identificación específica es muy difícil y no se puede agrupar dentro de un coste directo.

- Costes directos
  - o Costes de personal
  - o Costes de licencias
  - o Costes de material y equipos
  - o Coste eléctrico
- Costes indirectos
  - o Otros costes

### 10.1. Costes directos

#### 10.1.1. Coste personal

Persona física/ Entidad	Cualificación	Entrega (h/mes)	Duración del proyecto (mes)	Salario medio mensual (€/mes)	Salario medio por hora (€/h)	Coste total en el desarrollo del proyecto (€)
Castañar Real, Manuel	Ingeniería Mecánica	60	6	2200	12,5	4500

Castañar Real, Manuel	Redactor Documentalista	60	6	1150	6,534	2352,24
Consultor	Ingeniero Senior	8	6	2655	15	720
Castañar Real, Manuel	Edición/Contenido Multimedia	45	5	1056	6	1350
<b>Coste personal total (€)</b>						<b>8922,24</b>

Tabla 8: Coste personal

#### 10.1.2. Costes de licencias

Software	Entrega (mes)	Cuota	Impacto sobre el proyecto (%)	Coste total (€)
Solid Edge Premium	6	402 €/mes	90	2412
ANSYS Workbench	3	1904,167 €/mes	70	5712,50
Office 2018 Professional	6	10 €/mes	75	60
Matlab R2016b	1	250 €/año	10	250

<b>Coste de licencias total (€)</b>	<b>8434,5</b>
-------------------------------------	---------------

*Tabla 9: Coste de licencias*

### 10.1.3. Coste de materiales y equipos

Componente	Cantidad	Coste unitario (€)	Coste total (€)
PC HP 15-BS520NS Intel Core i3-6006U	1 u.	485,59	485,59
Kit Prusa i3 Hephestos	1 u.	417	417
Bobina PLA Premium Blanco	750 g	20,99	20,99
Bobina PLA Basic Natural	1 kg	19,90	19,90
Bobina Fibra de Carbono Proto-Pasta	125 g	24,14	24,14
Papel de lija	5 u.	0,60	3
DimaFix (spray fijador)	2 u.	12	24
Espátula - BuildTak	1 u.	24,14	24,14
Alicates de corte	1 u.	5,45	5,45
<b>Coste de material y equipos total (€)</b>			<b>1024,21</b>

*Tabla 10: Coste de materiales y equipos*



#### 10.1.4. Coste eléctrico

Dispositivo	Dedicación	Entrega (h/mes)	Duración del proyecto (mes)	Precio luz (€/KWh)	Coste total (€)
PC	Redacción, compilación, edición, etc.	60	6	0,123	44,28
Impresión 3D	Plato cónico	33,17	1	0,123	4,08
Impresión 3D	Aro de apriete	0,55	1	0,123	0,07
Impresión 3D	Carcasa Cónica pequeña	1,7	1	0,123	0,21
Impresión 3D	Carcasa Cónica Grande	7,42	1	0,123	0,91
Impresión 3D	Pieza del Pistón	1,15	1	0,123	0,14
Impresión 3D	Pinza Expansible D30	4,63	1	0,123	0,57
Impresión 3D	Pinza Expansible D35	7,07	1	0,123	0,87
Impresión 3D	Pinza Expansible D25	2,57	1	0,123	0,32

Impresión 3D	Pistón	4,58	1	0,123	0,56
Impresión 3D	Inútil	40	1	0,123	4,92
<b>Coste total eléctrico (€)</b>					<b>61,85</b>

Tabla 11: Coste eléctrico

## 10.2. Costes indirectos

### 10.2.1. Otros costes

Tipo	Cantidad	Coste unitario (€)	Coste total (€)
Desplazamientos	24	16	384
Impresión de documentos	-	±100	100
Soporte técnico	-	150	150
<b>Coste total general (€)</b>			<b>634</b>

Tabla 12: Otros costes

## 10.3. Resumen de costes

Desglose de costes		Valor (€)
Costes directos	Coste personal	8922,24

	Coste de licencias	8434,5
	Coste de material y equipos	1024,21
	Coste eléctrico	61,85
Costes indirectos	Otros costes	634
<b>Coste total imputable al proyecto de fin de carrera (€)</b>		<b>19076,8</b>

*Tabla 13: Resumen de costes*

## **11. Análisis y resultados**

### **11.1. Adecuación a la normativa vigente**

Este proyecto persigue adaptar el mandrino de sujeción de piezas por expansión a la normativa vigente. Por este motivo, en el siguiente apartado se realiza una descripción detallada en la que se comentan los aspectos más destacables de las normas a las que está sujeto un mandrino normalizado.

#### 11.1.1. Norma UNE-EN 1550:1998+A1:2008

La norma UNE-EN 1550:1998+A1:2008 incluye una serie de requisitos y/o medidas de seguridad para el diseño y la fabricación de platos portapiezas. Dentro de los requisitos de seguridad se encuentran varios apartados donde se especifican las medidas que deben cumplir los platos portapiezas. A continuación, se analizará cada uno de los apartados de los que se compone la norma.

##### **- Generalidades**

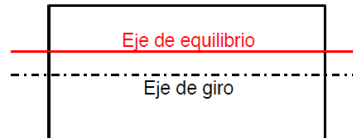
Dentro de la sección de generalidades, la norma exige que el plato de garras y su dispositivo de maniobra sean compatibles. Esta compatibilidad es difícil de conseguir debido a la gran variedad de narices de husillo presentes en tornos. Por este motivo se recurre a la Norma UNE-ISO 702-1:2011, donde se especifica los requisitos que deben cumplir esta adaptación.

El factor G de calidad de equilibrado debe venir dado por el fabricante. Este factor de calidad compone una variable importante para los cálculos de equilibrado, sin embargo, no es la única. Para entender adecuadamente qué es la calidad de equilibrado y a qué afecta es necesario entender los siguientes conceptos de equilibrado.

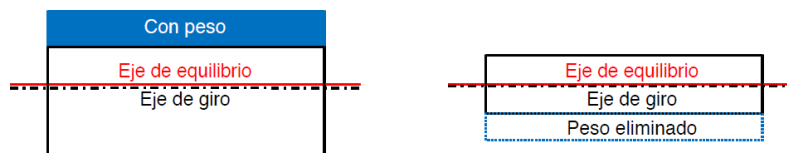
Un punto de desequilibrio se tiene lugar cuando dos cuerpos que presentan una rotación simultánea no presentan simetría. Este suceso origina vibraciones y oscilaciones perjudiciales para los componentes tales como desgaste, fatiga, rotura, etc. En el equilibrado de ejes de rotación adquieren una gran importancia las fuerzas centrífugas y centrípetas. Se pueden distinguir dos tipos de equilibrado.

- Equilibrado estático

Un desequilibrio estático tiene lugar cuando un eje de rotación no coincide en el espacio con el eje de gravedad del cuerpo de rotación. Por este motivo se producen movimientos residuales tales como vibraciones mecánicas circulares y perpendiculares al propio eje de rotación. Este desequilibrio puede medirse cuando los rotores de los ejes están parados (estáticos).

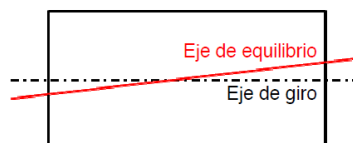


Las medidas que se llevan a cabo para reducir o eliminar este desequilibrio consisten en añadir, suprimir o mover una carga en un punto determinado.

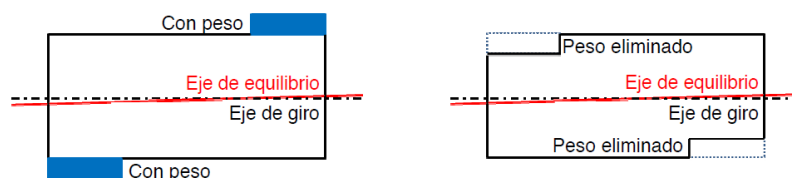


- Equilibrado dinámico

Un desequilibrio dinámico solo es observable cuando el eje de rotación está girando, es entonces cuando se producen oscilaciones orbitales en los extremos del eje. Se debe principalmente a desgastes radiales y axiales que coexisten en el conjunto del rotor.



Las medidas que se llevan a cabo para reducir o eliminar este desequilibrio consisten en añadir, suprimir o mover cargas en dos niveles.



Las influencias en el desequilibrio pueden darse por cualquier factor exterior, desde el husillo de la máquina hasta un tipo de refrigerante en mal estado o la suciedad. Asimismo, el peso de los componentes y las velocidades son también factores muy importantes.

El rotor de un husillo convencional suele presentar unas restricciones más exhaustivas de equilibrado debido principalmente a su peso, debido a que suele estar en unos 15 *kg*.

Otros factores importantes de desequilibrio son los errores de instalación o la suciedad presente en las pinzas o tuercas, que causan excentricidades y producir pequeñas oscilaciones y/o vibraciones.

Gracias a las variables de calidad de equilibrio ( $G$ ), peso del rotor ( $M$ ), velocidades ( $n$ ) y el factor de conversión (9549) los cálculos para la obtención del desequilibrio residual del rotor admisible ( $U_{zul}$ ), así como la excentricidad admisible ( $e_{zul}$ ) y el desequilibrio de la masa en el mayor radio exterior ( $u$ ) para un modelo genérico son:

$$U_{zul} = \frac{G * M * 9549}{n} \quad e_{zul} = \frac{U_{zul}}{M} \quad u = \frac{U_{zul}}{R} \quad (11.1)$$

A continuación, se analizará la masa de equilibrio admisible en su diámetro máximo para un husillo genérico. Este estudio mostrará la importancia del peso de los componentes sobre el resultado final. Para el desarrollo del mismo se han tomado datos técnicos proporcionados por la empresa GerSwiss Ibérica Technology.

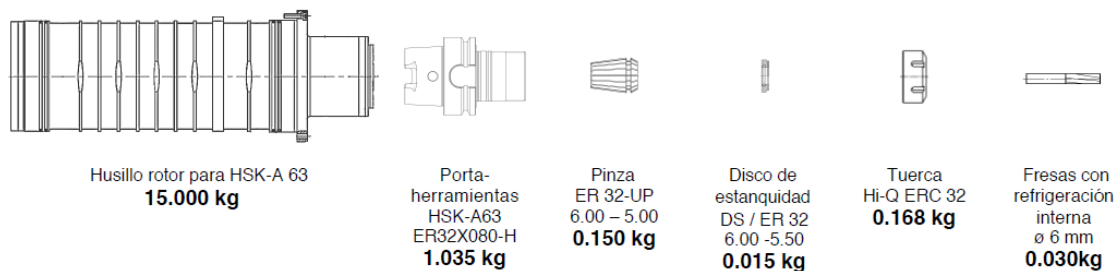


Figura 66: Elementos mecánicos que componen un sistema de fijación de un torno

Peso del sistema ( <i>kg</i> )	16,398	
Radio ( <i>mm</i> )	29,5	
Revoluciones ( <i>min</i> <sup>-1</sup> )	10000	40000
Calidad del equilibrado ( <i>G</i> )	2,5	2,5

*Tabla 14: Especificaciones técnicas predeterminadas*

El valor seleccionado para el factor de calidad del equilibrado (*G*), conforme a la Norma ISO 1940-1, es de clase G 2,5 a 20000 rpm que presenta un desequilibrio de  $1 \frac{g*mm}{kg}$ .

Según la normativa ISO la tolerancia que mide el desequilibrio aumenta cuanto mayor es la cantidad de masa que presenta un portaherramientas. *G* es un valor que depende de la velocidad giratoria, de la masa del cuerpo y del desequilibrio. La clase no podría determinarse si no se supiera la velocidad giratoria.

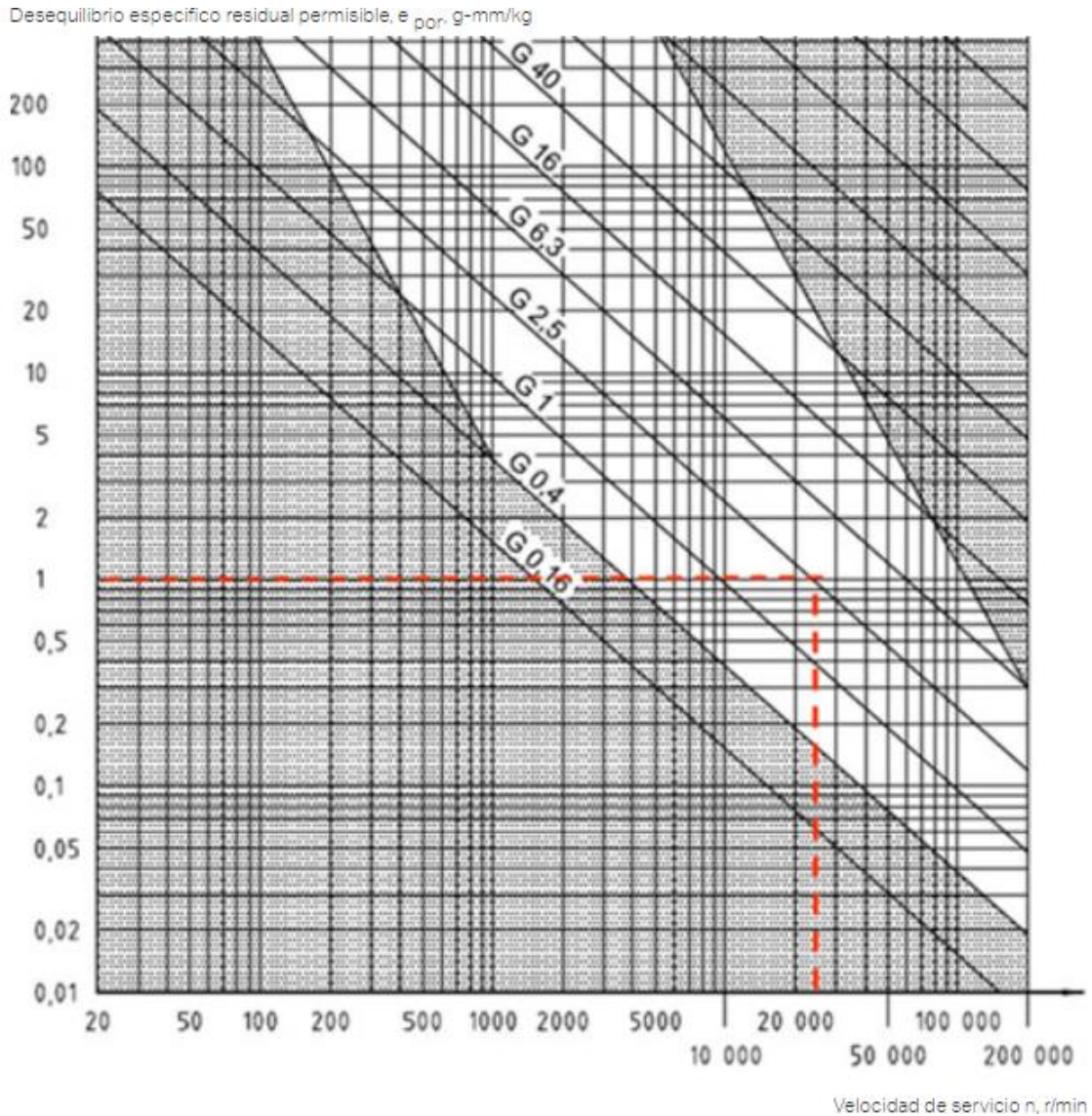


Gráfico 14: Desequilibrio específico residual permisible para diferentes niveles clase G según la Norma ISO 1940-1

A partir de los datos técnicos del sistema de sujeción que se han descrito anteriormente se procede a la resolución de las fórmulas.

$$U_{zul} = \frac{G * M * 9549}{n} = \frac{2,5 * 16,398 * 9549}{10000} = 39,146 \text{ gmm} \quad (11.2)$$

$$e_{zul} = \frac{U_{zul}}{M} = \frac{39,146}{16,398} = 2,387 \text{ } \mu\text{m} \quad (11.3)$$

$$u = \frac{U_{zul}}{R} = \frac{39,146}{29,5} = 1,327 \text{ g} \quad (11.4)$$



$$U_{zul} = \frac{G * M * 9549}{n} = \frac{2,5 * 16,398 * 9549}{40000} = 9,786 \text{ gmm} \quad (11.5)$$

$$e_{zul} = \frac{U_{zul}}{M} = \frac{9,786}{16,398} = 0,597 \text{ } \mu\text{m} \quad (11.6)$$

$$u = \frac{U_{zul}}{R} = \frac{9,786}{29,5} = 0,332 \text{ g} \quad (11.7)$$

La masa que produce desequilibrio en el diámetro máximo del sistema de sujeción es de 1,327 g para 10000  $\text{min}^{-1}$  y de 0,332 g para 40000  $\text{min}^{-1}$ .

A continuación, el siguiente cálculo indica cómo afecta la disminución de la masa sobre los valores de desequilibrio. Los resultados obtenidos se aproximan más al diseño propuesto, debido a que esta disminución de masa se ajusta mejor al material plástico con el que estará fabricado.

Peso del sistema (kg)	0,2	
Radio (mm)	29,5	
Revoluciones ( $\text{min}^{-1}$ )	10000	40000
Calidad del equilibrado (G)	2,5	2,5

Tabla 15: Especificaciones técnicas pinza expansible

$$U_{zul} = \frac{G * M * 9549}{n} = \frac{2,5 * 0,2 * 9549}{10000} = 0,477 \text{ gmm} \quad (11.8)$$

$$e_{zul} = \frac{U_{zul}}{M} = \frac{0,477}{0,2} = 0,029 \text{ } \mu\text{m} \quad (11.9)$$

$$u = \frac{U_{zul}}{R} = \frac{0,477}{29,5} = 0,016 \text{ g} \quad (11.10)$$

$$U_{zul} = \frac{G * M * 9549}{n} = \frac{2,5 * 0,2 * 9549}{40000} = 0,119 \text{ gmm} \quad (11.11)$$

$$e_{zul} = \frac{U_{zul}}{M} = \frac{0,119}{0,2} = 0,595 \mu m \quad (11.12)$$

$$u = \frac{U_{zul}}{R} = \frac{0,119}{31,5} = 0,004 g \quad (11.13)$$

La masa que produce desequilibrio en el diámetro máximo del sistema de sujeción es de 0,016 g para 10000  $min^{-1}$  y de 0,004 g para 40000  $min^{-1}$ .

Por otro lado, deben existir medidas de seguridad contra la proyección de las garras base debido a la actuación de las fuerzas centrífugas. Sin embargo, en el diseño propuesto, el riesgo por proyección de garras por fuerzas centrífugas es nulo, debido a que se utiliza un sistema de pinza expansible para la sujeción de piezas.

#### - Requisitos particulares

Según la normativa citada se deben especificar para platos autocompensado un número máximo de revoluciones partido por minuto. Según los cálculos teóricos realizados en el modelo, se ha determinado que este valor no puede superar las 15000 *rpm*.

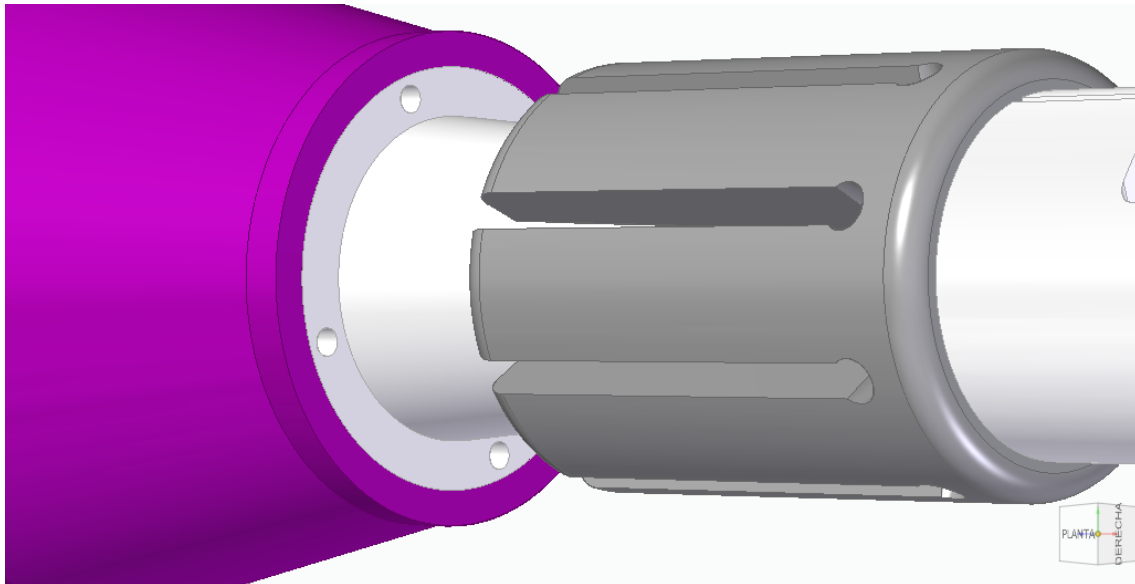
#### - Plato de control asistido

Según la normativa para garantizar que la fuerza de sujeción de un plato de garras, o de la pinza expansible en el modelo planteado, se aplique correctamente es necesario incorporar dispositivos que aseguren su correcto funcionamiento y evitar fallos de sujeción.

El diseño del mandrino para sujeción de piezas propuesto presenta un tipo de sensor que permite identificar cuando la pinza expansible está correctamente posicionada para que el mecanizado pueda comenzar. La pieza cuenta con una serie de orificios de pequeño diámetro, estos orificios tienen como objetivo conducir un flujo de aire constante. Cuando la pieza es accionada por el pistón realiza un desplazamiento horizontal hasta impactar contra un tope físico del mandrino. Este tope físico cuenta con los orificios de salida del aire. El sensor detecta si están abiertos o cerrados los orificios de salida del aire. Si los agujeros están abiertos el sensor no permite el mecanizado de la pieza debido a que la pinza expansible no está en una posición adecuada. Por el contrario, si están

obstruidos o cerrados, el sensor asegura que el mandrino está listo para ejecutar el mecanizado.

A continuación, se muestra una ilustración donde se observan los orificios de salida del aire y la pinza expansible en posición de reposo.



*Figura 67: Orificios de salida de flujo de aire en el diseño del mandrino para sujeción de piezas por expansión*

- Llave de apriete y herramienta similar

En este apartado de la norma se analiza el sistema de apriete manual de todo tipo de platos y las herramientas empleadas. Sin embargo, el mandrino para sujeción de piezas expansibles no dispone de apriete manual de garras debido a que la sujeción de piezas se realiza a través de una pinza expansible que es accionada por un pistón neumático o hidráulico.

- Platos con gargantas o ranuras

Los platos que incluyan algún tipo de ranura abierta o con garganta deben equipar sistemas de seguridad para evitar proyección de elementos por las fuerzas centrífugas. En este caso no se incluyen ninguna ranura abierta o garganta que pueda originar un riesgo de proyección.

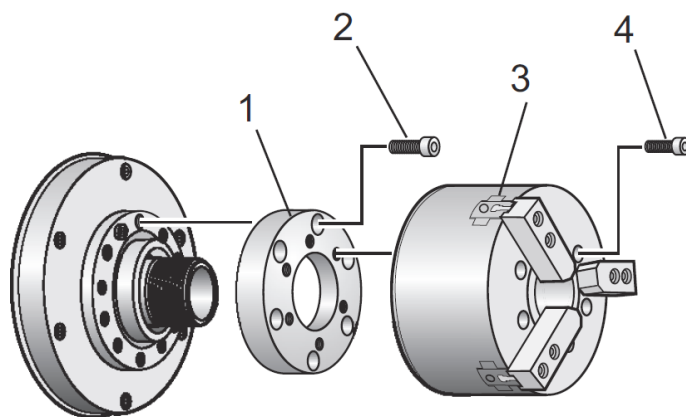
Cabe destacar que algunos de requisitos o medidas de seguridad han sido descartados debido a que no se adecuán al dispositivo planteado.

### 11.1.2. Norma UNE-ISO 702-1:2011<sup>11</sup>

La Norma ISO 702 bajo el título general de Máquinas herramientas describe las cotas de conexión de narices de husillos y de mandriles de sujeción.

Para normalizar el diseño del plato de garras se realiza una adaptación a la Norma ISO 702 donde se fijan medidas. Estas medidas permiten adaptar cada nariz de husillo con sus correspondientes caras de contraplato.

Cabe destacar que se van a establecer unas dimensiones determinadas para la adaptación entre el plato de garras y la nariz de husillo. Existen muchas variantes de narices de husillo, por este motivo, aunque el plato de garras diseñado esté normalizado para una de las variantes no quiere decir que pueda adaptarse a cualquier tipo de torno. Por esta razón, se utilizan placas adaptadoras entre un plato de garras determinado y una nariz de husillo. El principal objetivo del plato adaptador es adecuar el plato de garras para cualquier modelo de nariz de husillo.



*Figura 68: Ilustración de la adaptación de un plato de garras a una nariz de husillo: 1- Placa adaptadora del plato de garras. 2- Tornillo SHCS. 3- Plato de garras. 4- Tornillo SHCS*

### 11.1.3. Norma de adaptación del pistón

El pistón, de accionamiento hidráulico o neumático, es fundamental para el correcto funcionamiento del mandril diseñado. Este pistón tiene como objetivo producir un desplazamiento lineal que produzca cambios en la pieza expansible. La pieza expansible

<sup>11</sup> Consultar ANEXO IX para observar dimensiones de la nariz de husillo según Norma UNE-ISO 702-1:2011.

sufrirá tanto un desplazamiento lineal como radial, aumentado así su geometría (expansión).

Para adaptar adecuadamente la geometría del pistón a un torno determinado se han tomado una serie de medidas similares a la adaptación entre el plato de garras con la nariz de husillo. Las condiciones geométricas varían según el torno seleccionado, por tanto, el pistón de 10 *mm* de diámetro se ha fabricado con un roscado en la parte más próxima al torno, de tal forma que puedan fabricarse placas cilíndricas adaptadoras para las condiciones geométricas de cada torno.

Cabe destacar que el uso de un accionamiento neumático sería compatible, debido a que en el mercado existen una gran variedad de actuadores neumáticos que proporcionan un rango de presiones dentro de los requisitos establecidos. Los requisitos, en este caso neumáticos, que debe cumplir el diseño son proporcionar a la pieza expansible una fuerza lineal de 500 *N*. En este diseño el pistón se compone de dos émbolos. El primer émbolo presenta un diámetro de 18 *mm* y el segundo émbolo de 24 *mm*. Ambos émbolos producen un desplazamiento simultáneo sobre la pieza expansible. Por lo tanto, aplicando la ecuación:

$$P = \frac{F}{S} \quad (11.14)$$

Para el émbolo de 18 *mm*:

$$P_1 = \frac{F}{S} = \frac{250}{\pi * (0,018)^2} = 245609,4801 \text{ Pa} = 2,456 \text{ bar} \quad (11.15)$$

Para el émbolo de 24 *mm*:

$$P_2 = \frac{F}{S} = \frac{250}{\pi * (0,024)^2} = 138155,3325 \text{ Pa} = 1,381 \text{ bar} \quad (11.16)$$

La presión total para efectuar la retracción del émbolo será igual a:

$$P_T = P_1 + P_2 = 3,838 \text{ bar} \quad (11.17)$$

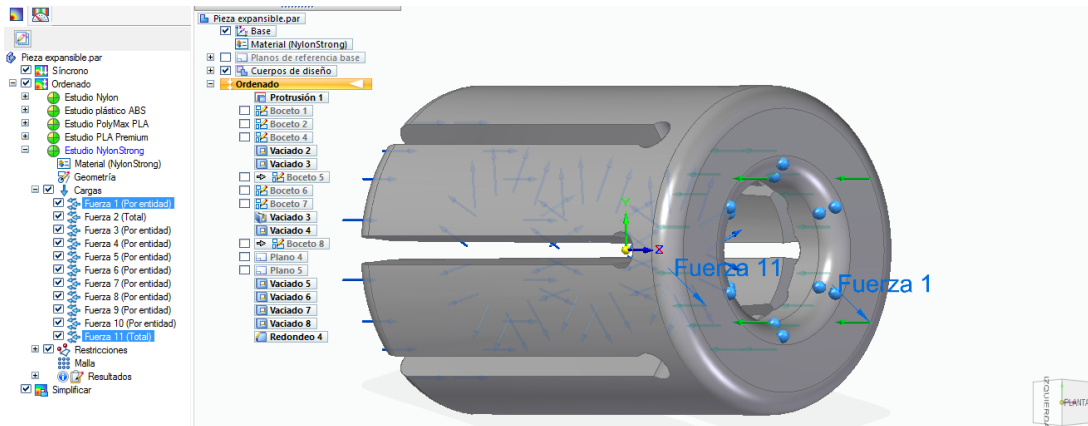




Figura 69: Imagen representativa de las fuerzas que actúan sobre la pieza expansible del mandril



**SHORT STROKE CYLINDERS**  
 $\varnothing$  8 to 100 mm - single and double acting  
with single/double rod, antirotation device



Series  
**441**

---


<p><b>GENERAL</b></p> <p>Detection</p> <p>Fluid</p> <p>Operating pressure</p> <p>Ambient temperature</p> <p><b>CONSTRUCTION</b></p> <p>Body</p> <p>Piston rod</p> <p>Rod end</p> <p>Internal parts</p> <p>Piston seals</p> <p>Bearing</p> <p>Front, rear or side mounting</p>	<p>Equipped for magnetic position detectors</p> <p>Air or neutral gas, filtered, lubricated or not</p> <p>2 to 10 bar</p> <p>-10°C to +70°C</p> <p>Light alloy</p> <p>Stainless steel (<math>\varnothing</math>8, 10, 12 and 20 mm)</p> <p>Hard chrome steel (<math>\varnothing</math> 16, 25 and 32 to 100 mm)</p> <p>Tapped</p> <p>POM (polyacetal) or light alloy</p> <p>PUR (polyurethane) and NBR (nitrile)</p> <p>Self lubricating</p> <p>With screws (not supplied)</p> <p>or flange (see mounting section)</p>	 <div style="background-color: grey; color: white; padding: 5px; font-weight: bold; font-size: 24px; width: 40px; height: 40px; display: flex; align-items: center; justify-content: center; margin: 0 auto;">B</div>
---	--	--

Figura 70: Ejemplo que muestra el rango de operación de presiones en un pistón neumático de un fabricante

El objetivo principal del proyecto consiste en analizar el comportamiento mecánico que presenta el sistema de sujeción de piezas por expansión de un mandril fabricado mediante deposición fundida de bajo coste y comparar los resultados con los de un mandril normalizado.

Los ensayos y resultados obtenidos del modelo propuesto se pueden clasificar en dos grupos de análisis. Por un lado, se examinarán las conclusiones del análisis de la pinza expansible de sujeción para un estado estático. Por otro lado, se examinarán los resultados obtenidos del estudio de contacto de la pinza expansible.

## 11.2. Análisis de la pinza expansible en estado estático

El propósito de este análisis es estudiar el desplazamiento originado en la pinza expansible justo en un instante previo al momento de la plastificación que presenta el material seleccionado.

Los compuestos plásticos seleccionados han sido los siguientes:

- PLA Premium (Ácido Poliláctico)
- PLA PolyMax (Ácido Poliláctico)
- Nylon
- ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno)

Los resultados obtenidos tras realizar el estudio de esfuerzos mediante el Método de Elementos Finitos se resumen en la siguiente tabla.

Material	Límite Elástico (MPa)	Módulo de Young (MPa)	Variación Diametral Máxima (mm)
PLA Premium	55	3800	2,58
PLA PolyMax	28,1	1879	2,54
Nylon	37,921	1378,951	3
ABS	31,026	1378,951	3
Acero C45E	1200	193000	1,1

Tabla 16: Resultados Análisis de esfuerzos en estado estático

Como se observa, los materiales que presentan una mayor deformación son el Nylon y el ABS con un aumento máximo del diámetro de 3 mm. Seguidamente se encuentra el PLA Premium con un aumento en su diámetro de unos 2,6 mm. El PLA PolyMax presenta un valor de deformación muy parecido al PLA Premium, con un valor de deformación de 2,54 mm. Finalmente, el Acero C45E es el material que menos deformación admite.

Cabe destacar que el valor de la deformación diametral máxima no es el único factor que interviene en el estudio del comportamiento mecánico del material. Las propiedades

como el límite elástico, Módulo de Young o elongación máxima, presenta una gran importancia en los análisis.

Por este motivo, el material elegido para la fabricación de la pinza expansible fue el PLA Premium, pues, aunque no presenta una gran elongación máxima, si muestra un excelente comportamiento ante los esfuerzos de compresión, tracción, flexión y torsión, si es comparado con los compuestos plásticos anteriores.

Para estudiar más detalladamente la repercusión de las propiedades mecánicas del PLA Premium se ha realizado un estudio de contacto que se describe en el siguiente apartado.

### **11.3. Análisis de contacto no lineal de la pinza expansible**

El objetivo del presente análisis es examinar detalladamente el comportamiento mecánico que ofrece el sistema de sujeción del mandrino cuando es sometido a un contacto no lineal.

Durante este estudio se realizará una comparación entre los resultados obtenidos para el compuesto plástico seleccionado anteriormente, PLA Premium (Ácido Poliláctico), y para un material normalizado, en este caso Acero C45E.

#### **11.3.1. Estudio de contacto entre la pinza expansible y el plato cónico**

La finalidad que persigue este estudio de contacto es observar los cambios mecánicos que experimenta la pinza expansible cuando entra en contacto con la superficie cónica del plato cónico.

Las conclusiones del examen abordan unos resultados de desplazamiento horizontal para una pinza fabricada en PLA Premium y otra en Acero C45E.

Sin embargo, estos resultados deben ser interpretados para contrastarlos con las conclusiones obtenidas para el análisis en estado estático de la pinza expansible.

Como es conocido el ángulo de inclinación del cono,  $\alpha = 5,72^\circ = 0,1 \text{ rad}$ , se puede calcular el desplazamiento diametral máximo y así contrastar los estudios.

- Para la pinza fabricada en PLA Premium:



$$tg(5,72^\circ) \times x \times 2 = \Delta D = \text{Variación Diametral máxima} \quad (12.1)$$

$$x = 12,153 \text{ mm}$$

$$\Delta D = tg(5,72^\circ) \times 12,153 \times 2 = 2,43 \text{ mm}$$

Los resultados del estudio de contacto no lineal arrojan unos resultados muy parecidos a los obtenidos para el análisis en estado estático de la pinza expansible

- Para la pinza fabricada en Acero C45E:

$$tg(5,72^\circ) \times x \times 2 = \Delta D = \text{Variación Diametral máxima} \quad (12.2)$$

$$x = 7,5608 \text{ mm}$$

$$\Delta D = tg(5,72^\circ) \times 7,5608 \times 2 = 1,51 \text{ mm}$$

Los resultados del estudio de contacto no lineal revelan unos valores numéricos que difieren en gran medida con los valores obtenidos para el estudio estático de la pinza expansible. El motivo de esta diferencia puede deberse a las propiedades presentes en el material “Structural Steel” empleado para la resolución de cálculos con el ANSYS Workbench.

#### 11.3.2. Estudio de contacto entre la pinza expansible y una pieza geoméricamente determinada

Finalmente, se ha desarrollado un estudio donde se ha tenido en cuenta el contacto entre la pinza expansible y la pieza que se desea mecanizar.

El objetivo principal de este estudio es comprobar si una pinza fabricada en distintos materiales, PLA Premium o Acero C45E, es capaz aguantar la fuerza de amarre total ( $F_{spz}$ ) de una pieza geoméricamente determinada, fabricada en distintos materiales a su vez.

Se distinguen cuatro modelos posibles de estudios en los que se destacan las siguientes conclusiones.

- Pinza expansible fabricada en PLA Premium y pieza fabricada en PLA Premium

Tras examinar el diagrama de esfuerzos en el modelo descrito y para un contacto plástico-plástico se observa que para una fuerza de amarre total igual a:

$$F_{spz} = 262,815 \text{ N}$$

El diseño soporta unas tensiones máximas por debajo del límite elástico del material empleado.

$$(\sigma_{adm} = 13,165 \text{ MPa}) < (\sigma_e = 55 \text{ MPa})$$

Por lo tanto, esta configuración es apta para un mecanizado por torneado para la pieza geoméricamente determinada empleada.

- Pinza expansible fabricada en PLA Premium y pieza fabricada en Acero C45E

Para un contacto entre una pinza fabricada en PLA Premium y una pieza compuesta por Acero C45E la fuerza de amarre máxima que debe soportar el sistema, en concreto la pinza expansible, es la siguiente:

$$F_{spz} = 13,12 \text{ KN}$$

Este estudio es el más crítico debido a que sus valores proporcionan resultados sobre la posibilidad futura de mecanizar piezas de acero mediante el empleo de mandrinos plásticos.

Según el cálculo mediante el empleo del Método de Elementos Finitos proporcionado por el programa ANSYS Workbench, el diseño propuesto es capaz de soportar las tensiones admisibles para esta carga.

$$(\sigma_{adm} = 47,803 \text{ MPa}) < (\sigma_e = 55 \text{ MPa})$$

Por este motivo la configuración es apta para desarrollar las operaciones de mecanizado por torneado para la pieza geoméricamente determinada empleada.

- Pinza expansible fabricada en Acero C45E y pieza fabricada en PLA Premium

Para la configuración de una pinza compuesta de Acero C45E y una pieza compuesta por PLA Premium se obtiene una fuerza máxima de amarre, teniendo en cuenta las fuerzas centrífugas, de:

$$F_{spz} = 263,07 \text{ N}$$

Al tratarse de una pinza compuesta de Acero C45E el límite elástico aumenta considerablemente y se demuestra que la tensión admisible resultante es inferior al límite elástico del material.

$$(\sigma_{adm} = 12,23 \text{ MPa}) < (\sigma_e = 1200 \text{ MPa})$$

Por lo tanto, esta configuración es apta para el mecanizado

- Pinza expansible fabricada en Acero C45E y pieza fabricada en Acero C45E

Finalmente, para un contacto no lineal entre pinza y pieza fabricada en acero la fuerza de amarre total necesaria que necesita soportar el sistema para evitar el movimiento relativo entre los elementos es:

$$F_{spz} = 23,6 \text{ KN}$$

Los análisis obtenidos concluyen que la tensión admisible que deriva de la carga anterior no supera el límite elástico del acero empleado.

$$(\sigma_{adm} = 921,85 \text{ MPa}) < (\sigma_e = 1200 \text{ MPa})$$

Por lo tanto, esta configuración también sería apta para el mecanizado mediante torneado de una pieza geoméricamente determinada.

## **12. Conclusión**

La flexibilidad y los costes de producción son dos de los factores más importantes en la industria del mecanizado. Dada la relevancia de estos dos aspectos, el desarrollo del proyecto se ha centrado, por un lado, en el diseño de un prototipo que permita mejorar la flexibilidad de amarre de piezas de mecanizado. Para ello, se ha apostado por sistema innovador de agarre por expansión que cuenta con una cadencia mucho menor que el habitual plato de garras.

Por el otro, la elaboración de este sistema de sujeción por deposición fundida de bajo coste permite abaratar los gastos de producción de forma muy notable. Esta reducción del presupuesto se debe fundamentalmente a que puede fabricarse mediante impresoras 3D, por lo que resulta más asequible. Por tales motivos, este prototipo pretende cubrir las necesidades individuales y no está tan dirigido a sistemas de producción y fabricación en serie.

Finalmente, cabe señalar que uno de los objetivos más importantes que ha conseguido alcanzar el estudio mediante el Método de Elementos Finitos es demostrar que no solo se pueden mecanizar piezas plásticas mediante el uso de la pinza expansible propuesta, sino que también es posible hacerlo con piezas fabricadas en aceros.

### **12.1. Futuras líneas de investigación**

A continuación, se exponen algunas de las líneas de investigación que se proponen para continuar este estudio.

En primer lugar, el proyecto propone un mandrino diseñado completamente en plástico. Aunque la pieza más crítica es la pinza expansible, sería interesante estudiar cómo actúan los esfuerzos en todos y cada uno de los componentes que integran el mandrino. Para este fin, resultaría muy útil disponer de un programa de desarrollo, que superara las funcionalidades de la versión de estudiante que se ha empleado, para examinar detalladamente de cada nodo.

En segundo lugar, sería interesante desarrollar nuevos estudios de esfuerzos en la pinza expansible para un mayor número de compuestos plásticos distintos. Como, por ejemplo, para nuevos materiales que combinan compuestos plásticos con fibras.

Del mismo modo, sería conveniente la continuación de los estudios relacionados con la resistencia a la fatiga de la pinza expansible. El comportamiento frente a cargas variables en el tiempo, siempre por debajo de la resistencia del material, permite calcular el número de ciclos que podría soportar la pinza. Estos análisis no permitirían modificar el diseño del mandrino para evitar posibles concentradores de tensión.

Finalmente, se destaca la búsqueda de posibles modificaciones en la pinza expansible que aseguren un contacto aún más uniforme para piezas que requieran un proceso de mecanizado.

### 13. Bibliografía

Aceros Griñón (2015): Tablas de Equivalencia Internacionales. Disponible en: <http://www.acerosgrinon.com/productos/utilidades/TABLAS-EQUIVALENCIAS-INTERNACIONALES> [Consultado el 25 de abril de 2018]

ANSYS (2018): Engineering Simulation Platform. Disponible en: <https://www.ansys.com/products/platform> [Consultado el 1 de abril de 2018]

ASCO Numatics (2018): Actuadores Neumáticos. Disponible en: <https://www.asconumatics.eu/images/site/upload/es/actuadores-neumaticos-es.pdf> [Consultado el 25 de marzo de 2018]

BĚHÁLEK Luboš et al. (2012): Friction properties of composites with natural fibres, synthetic and biodegradable polymer matrix. Recuperado de: <http://nanocon2013.tanger.cz/files/proceedings/04/reports/722.pdf> [Consultado el 10 de abril de 2018]

Bove-ag Plásticos y Elastómeros S.L. (2018): Coeficientes de fricción. Disponible en: [http://www.plasticos-mecanizables.com/plasticos\\_coeficiente\\_friccion.html](http://www.plasticos-mecanizables.com/plasticos_coeficiente_friccion.html) [Consultado el 10 de abril de 2018]

Canteli, J.A. et al. (2018): Tema 2. Procesos de Fabricación. Sistemas de Producción y Fabricación. Universidad Carlos III de Madrid. Recuperado de: <http://ocw.uc3m.es/ingenieria-mecanica/sistemas-de-produccion-y-fabricacion/material-de-clase-1/TEMA-2.pdf> [Consultado el 15 de marzo de 2018]

Carnicero, A. (2003): Introducción al método de los Elementos Finitos. Disponible en: [https://www.iit.comillas.edu/carnicero/Resistencia/Introduccion\\_al\\_MEF.pdf](https://www.iit.comillas.edu/carnicero/Resistencia/Introduccion_al_MEF.pdf) [Consultado el 3 de mayo de 2018]

Centro Avanzado de Fabricación (2018): Brochado. Recuperado de: <http://www.imh.eus/es/comunicacion/dokumentazio-irekia/manuales/introduccion-a-los-procesos-de-fabricacion/conformacion-por-mecanizado/mecanizado-por-arranque-de-viruta/brochado> [Consultado el 29 de marzo de 2018]

Direct Industry (2018): Muela Rectificadora/Cilíndrica/ De Cerámica. Disponible en: <http://www.directindustry.es/prod/tyrolit-schleifmittelwerke-swarovski-kg/product-37270-1630149.html> [Consultado el 16 de marzo de 2018]

DORMER PRAMET (2011): Catálogo General. Recuperado de: [https://www.dormerpramet.com/Downloads/GeneralCatalogue\\_2011\\_spa\\_ld.pdf](https://www.dormerpramet.com/Downloads/GeneralCatalogue_2011_spa_ld.pdf) [Consultado el 1 de marzo de 2018]

Ensinger S.A. (2018): Torneado. Disponible en: <http://www.ensinger.es/es/semielaborados/informacion-general-sobre-los-productos-semielaborados/mecanizado-de-piezas-semielaboradas/operaciones-de-mecanizado/torneado/> [Consultado el 3 de abril de 2018]

GerSwiss Ibérica Technology (2018): Equilibrado. Información Técnica. <http://www.gerswiss.com/wp-content/uploads/REGO-FIX-Equilibrado.pdf> [Consultado el 22 de marzo de 2018]

Haas Automation, Inc. (2014): Manual del operador del torno. Recuperado de: [https://diy.haascnc.com/sites/default/files/Locked/Manuals/Operator/2014/Lathe/Translated/Lathe\\_Operators\\_Manual\\_96-ES8900\\_Rev\\_A\\_Spanish\\_January\\_2014.pdf](https://diy.haascnc.com/sites/default/files/Locked/Manuals/Operator/2014/Lathe/Translated/Lathe_Operators_Manual_96-ES8900_Rev_A_Spanish_January_2014.pdf) [Consultado el 25 de marzo de 2018]

Interempresas.net (2015): Conceptos de utillaje para la mejora del mecanizado de componentes aeronáuticos de baja rigidez. Disponible en: <http://www.interempresas.net/Aeronautica/Articulos/143265-Conceptos-utillaje-para-mejora-del-mecanizado-componentes-aeronauticos-baja-rigidez.html> [Consultado el 15 de febrero de 2018]

IPARGAMA (2018): Acero de construcción al carbono. F-1140. Recuperado de: <http://ipargama.com/pdf/F-1140.pdf> [Consultado el 15 de abril de 2018]

Microsoft (2018): Elige tu Office. Disponible en: <https://www.microsoft.com/es-es/store/b/office?icid=TopNavSoftwareOffice&activetab=tab:homeorpersonal> [Consultado el 1 de abril de 2018]

Mitsubishi Materials (2018): Catálogo General. Recuperado de: [https://www.mitsubishicarbide.com/EU/es/product/pdf/c\\_n\\_other/c006s\\_n.pdf](https://www.mitsubishicarbide.com/EU/es/product/pdf/c_n_other/c006s_n.pdf) [Consultado el 1 de marzo de 2018]

NASA Technical Reports Server (2018): Additive Manufacturing and Characterization of Polylactic Acid (PLA) Composites Containing Metal Reinforcements. Disponible en: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20160010284.pdf> [Consultado el 14 de marzo de 2018]

Oposinet (2018): Tema 40 – Técnicas de mecanizado, conformación y unión de piezas metálicas. Recuperado de: <https://www.oposinet.com/temario-de-tecnologia/temario-1-tecnologia/tema-40-tnicas-de-mecanizado-conformacin-y-unin-de-piezas-metlicas/> [Consultado el 5 de abril de 2018]

Real Casa de la Moneda. Fábrica Nacional de la Moneda y Timbre (2017): Teoría de Taller. Procesos de Mecanizado. Disponible en: <http://www.fnmt.es/documents/10179/10659943/20180309-Taller4/5b4798b9-e94e-803b-3cde-a86c58c9bdd2> [Consultado el 15 de marzo de 2018]

Roller (2018): CAUSER. Catálogo de Producto. Disponible en: <http://www.roller.es/wp-content/catalogos/causer.pdf> [Consultado el 1 de marzo de 2018]

SANDVIK Coromant (2018): Equilibrado y rpm. CoroChuck 930 está equilibrado conforme a DIN 69888. Disponible en: <https://www.sandvik.coromant.com/es-es/knowledge/tooling-systems/machine-and-tooling-systems-considerations/balancing-and-rpm/pages/default.aspx> [Consultado el 28 de marzo de 2018]

Schab, L. (2011): Máquinas y herramientas. Guía didáctica. Recuperado de: <http://www.inet.edu.ar/wp-content/uploads/2012/11/maquinas-y-herramientas.pdf> [Consultado el 11 de febrero de 2018]

SENA. Sistema de Bibliotecas (2018). Diseño y Cálculo de Herramientas para Brochar. Disponible en: [http://biblioteca.sena.edu.co/exlibris/aleph/u21\\_1/alephe/www\\_f spa/icon/45896/Informador41/paginas/articulo04/edi41\\_articulo04\\_pag01.html](http://biblioteca.sena.edu.co/exlibris/aleph/u21_1/alephe/www_f spa/icon/45896/Informador41/paginas/articulo04/edi41_articulo04_pag01.html) [Consultado el 29 de marzo de 2018]



Siemens PLM (2018): Solid Edge. Disponible en: <https://www.plm.automation.siemens.com/store/es-es/solid-edge/> [Consultado el 1 de abril de 2018]

Soriano Heras E. et al. (2012): Modelos matemáticos para la determinación de fuerzas de amarre en mandriles expansibles. Recuperado de: <http://www.xixcnim.uji.es/CDActas/Documentos/ComunicacionesOrales/08-02.pdf> [Consultado el 14 de marzo de 2018]

Soriano, Enrique & Rubio, Higinio & GARCIA-PRADA, J.C. & Perez-Diaz, Jose Luis. (2013). Sistema neumático de detección de presencia y posicionado de pieza para procesos automáticos.

Tapio, A. (2018): Evolución de las herramientas de fresado. Disponible en: [http://www.revistatope.com/196\\_art\\_SECO\\_TOOLS\\_Fresadoras.html](http://www.revistatope.com/196_art_SECO_TOOLS_Fresadoras.html) [Consultado el 16 de marzo de 2018]

Tarifaluzhora (2018): Precio de la electricidad en tiempo real. Disponible en: <https://tarifaluzhora.es/> [Consultado el 2 de abril de 2018]

The Engineering ToolBox (2018): Friction and Friction Coefficients. Disponible en: [https://www.engineeringtoolbox.com/friction-coefficients-d\\_778.html](https://www.engineeringtoolbox.com/friction-coefficients-d_778.html) [Consultado el 10 de abril de 2018]

UNE-EN 1550:1998+A1 (2008): Seguridad de máquina herramientas. Requisitos de seguridad para el diseño y la fabricación de platos portapiezas.

UNE-ISO 702-1 (2011): Máquina-herramientas. Dimensiones de montaje de la nariz del husillo y de los platos de torno.

Universidad Autónoma Metropolitana (2011): Velocidades y avance para corte. Disponible en: <http://areamecanica.azc.uam.mx/Lab%20Procesos%20de%20Manuf%20II/Archivos/Ejemplo%20Velocidad%20de%20corte.pdf> [Consultado el 14 de marzo de 2018]

Universidad Politécnica de Madrid (2007): Sistemas de Producción. Mecanizado. Departamento de Materiales y Producción Aeroespacial. Escuela Técnica Superior de

Ingenieros Aeronáuticos. Disponible en:  
[http://mestreacasa.gva.es/c/document\\_library/get\\_file?folderId=500002361246&name=DLFE-286299.pdf](http://mestreacasa.gva.es/c/document_library/get_file?folderId=500002361246&name=DLFE-286299.pdf) [Consultado el 17 de febrero de 2018]

WASI (2011): Catálogo de productos normalizados. Recuperado de:  
[https://www.wasi.de/fileadmin/user\\_upload/Downloadbereich/kataloge/Catalogo\\_normalizado\\_2011.pdf](https://www.wasi.de/fileadmin/user_upload/Downloadbereich/kataloge/Catalogo_normalizado_2011.pdf) [Consultado el 2 de febrero de 2018]

## ANEXO I:

Especificaciones técnicas sobre los parámetros tecnológicos de corte en el torneado y fresado.

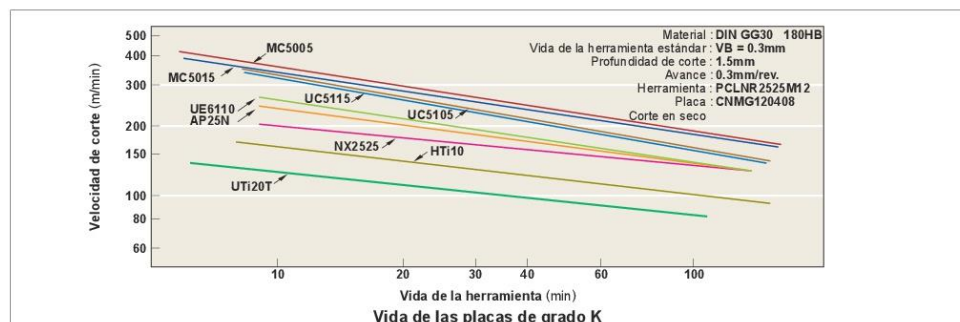
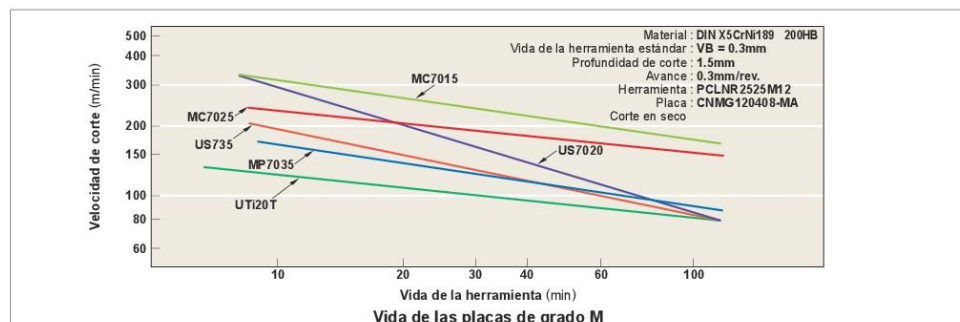
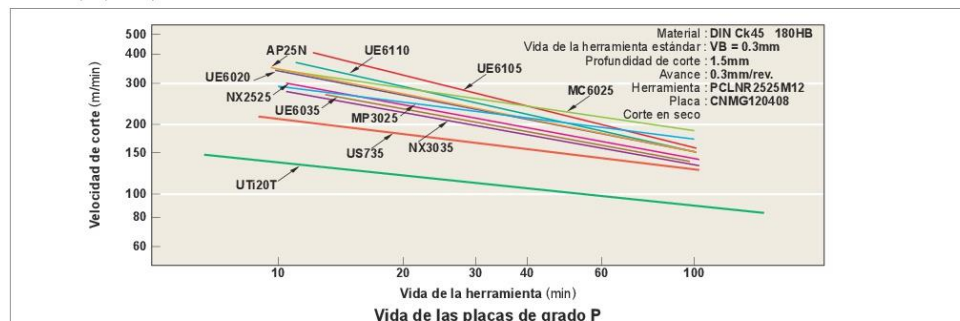
# EFFECTOS DE LAS CONDICIONES DE CORTE PARA TORNEADO

## EFFECTOS DE LAS CONDICIONES DE CORTE

Las condiciones de corte ideales serían: corto tiempo de corte, larga vida de la herramienta y buen acabado. Para obtener esas condiciones ideales se precisan condiciones de corte y herramientas adecuadas, así como el conocimiento de la pieza, dureza, forma y capacidad de la máquina.

## VELOCIDAD DE CORTE

La velocidad de corte tiene un efecto muy importante en la vida de la herramienta. Aumentándola, se incrementa la temperatura y se acorta la vida de la herramienta. La velocidad varía dependiendo de la dureza de la pieza. Seleccione una calidad apropiada para cada velocidad de corte.



DATOS TÉCNICOS

## Efectos de la velocidad de corte

1. Aumentando la velocidad de corte un 20%, se reduce la vida de la herramienta a la mitad. Aumentándola un 50%, se reduce la vida a 80%.
2. El mecanizando a baja velocidad (20–40m/min), tiende a causar vibraciones. Por ello, se acorta la vida de la herramienta.

## DATOS TÉCNICOS

# EFFECTOS DE LAS CONDICIONES DE CORTE PARA TORNEADO

### ■ AVANCE

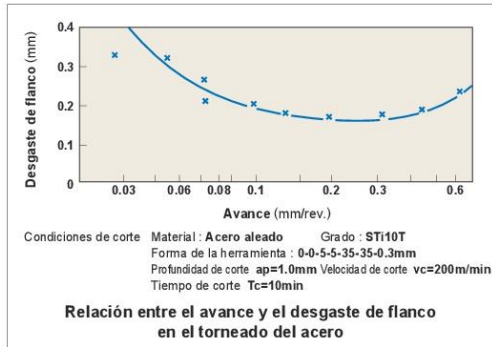
En torneado, el avance es la distancia que la herramienta se mueve por la pieza por revolución.

En fresado, el avance es la distancia recorrida por la mesa por cada revolución de la fresa dividida por el número de dientes.

De este modo, se indica como avance por diente. Área de avance relacionada con superficie de acabado rugosa.

### ● Efectos del avance

1. La reducción del avance influye en el desgaste de flanco y acorta la vida de la herramienta.
2. Aumentando el avance, se aumenta la temperatura de corte y el desgaste del flanco. Por ello, la influencia sobre la vida de la herramienta es mínima comparada con la de la velocidad de corte.
3. El aumento del avance, mejora la eficiencia del mecanizado.

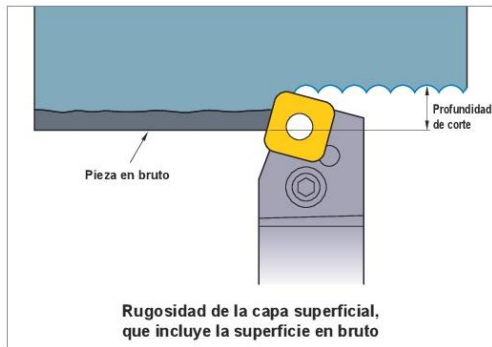
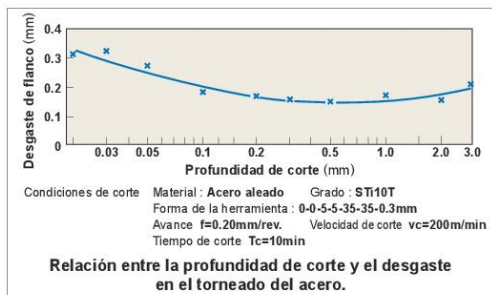


### ■ PROFUNDIDAD CORTE

La profundidad de corte se determina en relación a la cantidad de material a mecanizar, la forma de la pieza, la rigidez de la herramienta la potencia y rigidez de la máquina.

### ● Efectos de la profundidad de corte

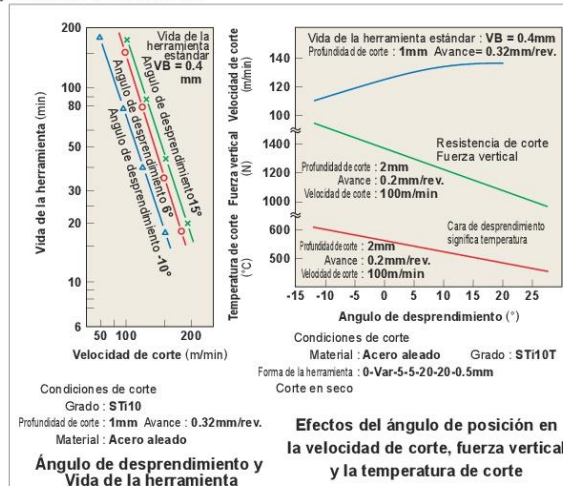
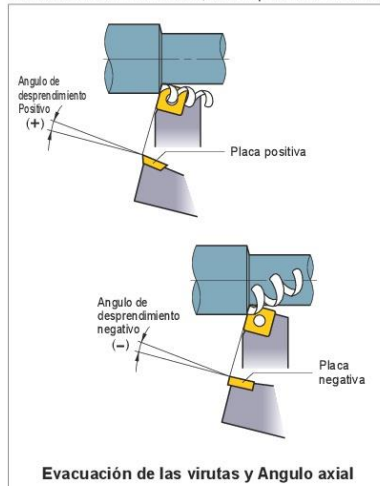
1. El cambio de la profundidad de corte, no afecta en gran medida a la vida de la herramienta.
2. Una pequeña profundidad de corte, endurece la capa superficial del material, debido a la fricción entre ellas. Por ello, se reduce la vida de la herramienta.
3. Cuando mecanizamos piezas en bruto de fundición, la profundidad de corte se tiene que aumentar tanto como permita la potencia de la máquina, para prevenir el contacto de las impurezas de la superficie con la placa e impedir las micro-roturas y el desgaste anormal.



# FUNCION DE LAS CARACTERISTICAS DE LAS HERRAMIENTAS PARA TORNEADO

## ■ ANGULO DE DESPRENDIMIENTO

El ángulo de desprendimiento es un ángulo del filo de corte que tiene un efecto importante en la resistencia al corte, la evacuación de las virutas, la temperatura de corte y la vida de la herramienta.



## ● Efectos del ángulo de desprendimiento

1. Aumentando el ángulo de desprendimiento en dirección positiva, se mejora la suavidad del corte.
2. Aumentando el ángulo de desprendimiento 1° en dirección positiva, decrece el esfuerzo de corte un 1%.
3. Aumentando el ángulo de desprendimiento en dirección positiva, se debilita el corte; y en la dirección negativa, se aumenta la resistencia al corte.

## Cuándo aumentar el ángulo de desprendimiento en la dirección (-) negativa

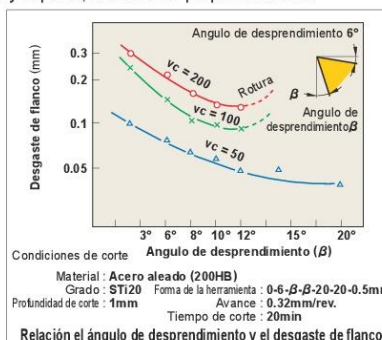
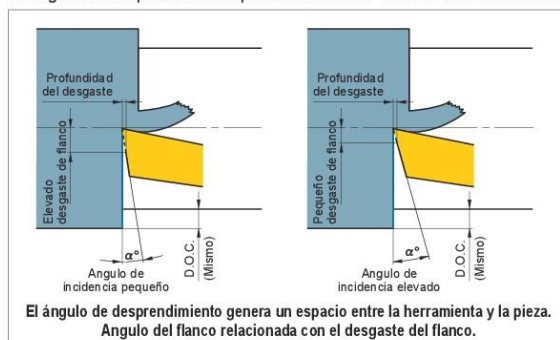
- Pieza endurecida.
- Cuando se requiere un filo robusto para mecanizar piezas en bruto y con corte interrumpido.

## Cuándo aumentar el ángulo de desprendimiento en la dirección (+) positiva

- Material blando.
- Material de fácil mecanizado.
- Cuando la pieza y la máquina tienen poca rigidez.

## ■ ANGULO DE INCIDENCIA

El ángulo de desprendimiento previene la fricción entre la cara de incidencia y la pieza, debido a un pequeño avance.



## ● Efectos del ángulo de incidencia

1. El aumento del ángulo de incidencia, reduce el desgaste del flanco.
2. El incremento del ángulo de desprendimiento, reduce la robustez del filo de corte.

## Cuándo reducir el ángulo de incidencia

- Piezas endurecidas.
- Cuando se necesita un filo robusto.

## Cuándo aumentar el ángulo de incidencia

- Materiales blandos.
- Materiales que se endurecen durante el mecanizado.

DATOS TÉCNICOS

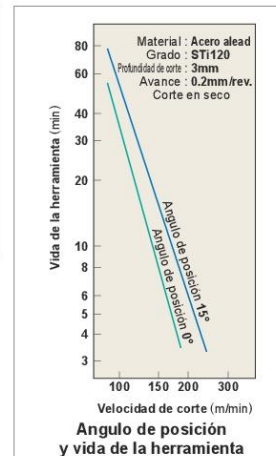
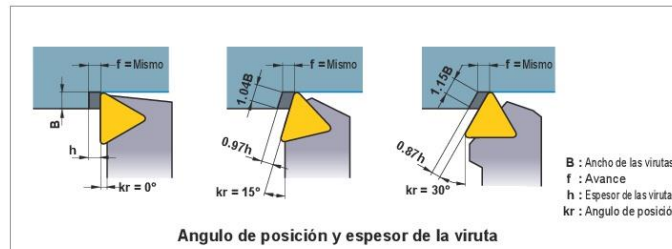


## DATOS TÉCNICOS

# FUNCION DE LAS CARACTERISTICAS DE LAS HERRAMIENTAS PARA TORNEADO

### ■ ÁNGULO DE POSICIÓN (ÁNGULO DE ATAQUE)

El ángulo de posición y el radio de la punta, reducen el impacto y el efecto de la fuerza de avance, de la fuerza hacia atrás y el espesor de las virutas.



### ● EFECTOS DEL ÁNGULO DE POSICIÓN (ÁNGULO DE ATAQUE)

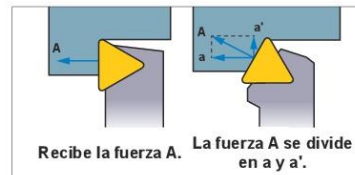
1. Con el mismo avance, incrementando el ángulo de posición, incrementamos la longitud de contacto de la viruta y decrece el espesor de ésta. Como resultado, el esfuerzo de corte se dispersa en un filo más largo y se incrementa la vida de la herramienta. (Ver diagrama)
2. Incrementando el ángulo de ataque, se incrementa la fuerza  $a'$ . Por ello, las piezas largas y delgadas, se doblan en muchos casos.
3. Incrementando el ángulo de posición, se reduce el control de viruta.
4. Incrementando el ángulo de posición, disminuye el espesor de la viruta y aumenta la longitud de la misma. Por lo tanto, la rotura de la viruta es más difícil.

#### Cuándo reducir el ángulo de ataque

- Acabado con poca profundidad de corte.
- Piezas largas y delgadas.
- Cuando la máquina tiene poca rigidez.

#### Cuándo aumentar el ángulo de ataque

- Piezas endurecidas producidas por una alta temperatura de corte.
- Cuando mecanizamos piezas de diámetros grandes.
- Cuando la máquina tiene poca rigidez.

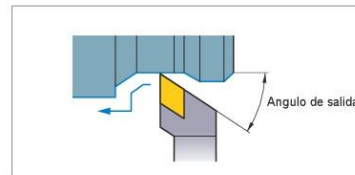


### ■ ÁNGULO DE SALIDA

El ángulo del filo de corte evita interferencias entre la superficie mecanizada y la herramienta. Generalmente 5°—15°.

### ● EFECTOS DEL ÁNGULO DE SALIDA

1. Reduciendo el ángulo de salida, incrementamos la resistencia del filo; pero, también incrementamos la temperatura de corte.
2. Reduciendo el ángulo de salida, la fuerza hacia atrás se incrementa y pueden aparecer vibraciones durante el mecanizado.
3. Se recomienda un pequeño ángulo de salida en desbaste y un gran ángulo en acabado.

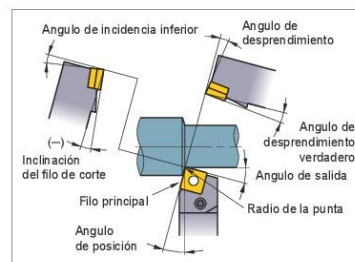


### ■ INCLINACIÓN DEL FILO DE CORTE

La inclinación de la arista de corte es la inclinación de la cara de desprendimiento. En el corte pesado, el filo recibe muchos golpes al comienzo del mecanizado. La inclinación del filo le protege de estos golpes y previene su fractura. Se recomiendan en torneado y en fresado.

### ● EFECTOS DE LA INCLINACIÓN DEL FILO DE CORTE

1. Una inclinación negativa (-) del filo, evacúa virutas en la dirección de la pieza; y positiva (+) las evacúa en la dirección opuesta.
2. Una inclinación negativa (-) del filo de corte, incrementa la robustez de éste; pero también incrementa el esfuerzo de corte.

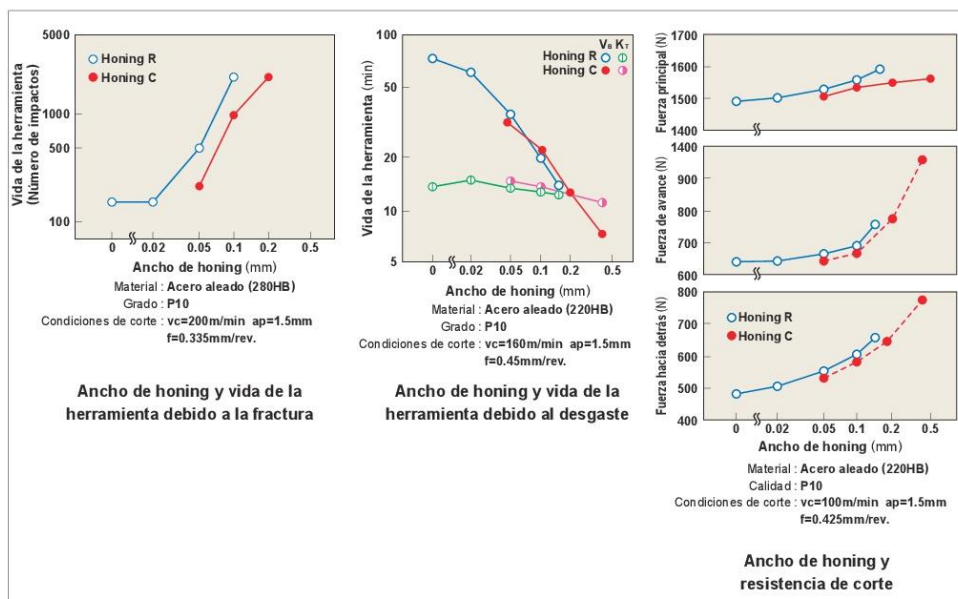
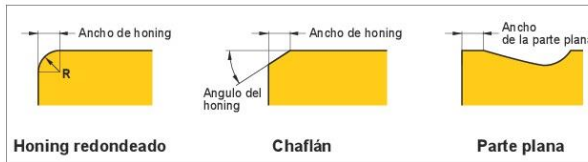


## HONING Y PLANO

El honing y la parte plana son formas del filo de corte y sirven para dar robustez a éste. El honing puede ser redondeado tipo chaflán.

La anchura óptima del honing es aproximadamente 1/2 del avance.

Land es la parte plana y estrecha sobre la cara de incidencia o desprendimiento.



## Efectos del honing

1. Aumentar el honing incrementa el esfuerzo de corte, la vida de la herramienta y reduce las roturas.
2. Aumentando el honing se incrementa el desgaste del flanco y se reduce la vida de la herramienta. El tipo de honing no afecta al desgaste en la cara de desprendimiento.
3. Aumentar el honing incrementa el esfuerzo de corte y la vibración.

### Cuándo reducir el tipo de honing

- Cuando acabamos con pequeña profundidad y poco avance.
- Materiales blandos.
- Cuando la pieza y la máquina tienen poca rigidez.

### Cuándo aumentar el tipo de honing

- Piezas endurecidas.
- Cuando se requiere resistencia del filo de corte para superficies sin cortar y corte interrumpido.
- Cuando la máquina tiene poca rigidez.

\*El metal duro, como Uti20T, los recubrimientos de diamante y las placas cermet, tienen un honing redondeado estándar.

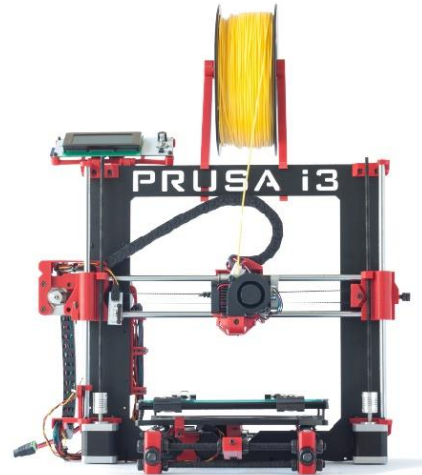
## ANEXO II:

### Ficha de características técnicas de impresora 3D Prusa i3 Hephestos.



Kit Prusa i3 Hephestos

## Kit Prusa i3 Hephestos



### CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

Toda la electrónica de Prusa i3 HEPHESTOS ha sido probada y calibrada para asegurar su óptimo funcionamiento. Tanto los drivers como el firmware vienen preparados para que el usuario pueda comenzar a imprimir nada más terminar el montaje.

#### Dimensiones y peso

Dimensiones impresora: 460 x 370 x 510 mm (sin bobina PLA)  
460 x 370 x 583 mm (con bobina PLA)  
Dim. área de impresión: 215 x 210 x 180 mm  
Dimensiones caja: 408 x 425 x 233 mm  
Peso caja: 11 Kg

#### Resolución de capas

Muy alta: 60 micras  
Alta: 100 micras  
Media: 200 micras  
Baja: 300 micras

#### Velocidad de impresión

Velocidad recomendada: 40-60 mm/s  
Velocidad máxima recomendada: 80-100 mm/s

#### Electrónica

Ramps 1.4  
Mega 2560  
Pantalla de LCD con encoder rotativo con pulsador para la navegación  
Base fría de cristal tamaño 220 x 220 x 3 mm  
Fuente de alimentación de 220 AC 12 DC 100W  
Termistores 100k en extrusor  
Cartucho calefactor 40W 12V

#### Mecánica General

Marco y base de aluminio pintado al polvo  
Barras de cromo duro para los carros X, Y, Z  
Rodamiento lineal de bolas LM8UU para X, Y, Z  
Rodamiento axial de bolas B623ZZ para las poleas X, Y  
Cadenas portacables ligas  
Acoplamientos flexibles para las varillas roscadas del eje Z  
Sistema de nivelado de base de impresión con 4 puntos y amortiguación  
Sistema de cambio rápido de base de impresión con clips  
Ventiladores brushless axiales con rodamientos de bolas  
Piezas impresas en PLA

#### Mecánica Extrusor

Extrusor de diseño propio  
Boquilla de 0.4 mm para filamento de 1.75 mm  
Disipador de aletas con ventilador axial  
Tobera de refrigeración de pieza

#### Software

Firmware derivado de Marlin  
Entorno recomendado: Cura Software, slic3r, Repetier, Kisslicer  
Archivos admitidos: gcode  
Sistemas operativos compatibles:  
Windows XP y superiores  
Mac OS X y superiores  
Linux

#### Comunicaciones

Lector de tarjetas SD  
Puerto USB tipo B

#### Seguridad

Extrusor protegido con pieza de diseño propio

#### Materiales de impresión

PLA, HIPS, FilaFlex entre otros

#### Contenido de la caja

6 guías de montaje  
Garantía  
Certificado de calidad



\* Imagen del dispositivo no contractual

Kit Prusa i3 Hephestos



### ANEXO III:

Muestra de lenguajes más utilizados para la programación en control numérico (CNC).

<b>Gnnn</b>	Standard GCode command, such as move to a point	<b>Para <i>firmwares</i> RepRap</b>
<b>Mnnn</b>	RepRap-defined command, such as turn on a cooling fan	
<b>Tnnn</b>	Select tool nnn. In RepRap, tools are extruders	
<b>Snnn</b>	Command parameter, such as the voltage to send to a motor	
<b>Pnnn</b>	Command parameter, such as a time in milliseconds	
<b>Xnnn</b>	An X coordinate, usually to move to	
<b>Ynnn</b>	A Y coordinate, usually to move to	
<b>Znnn</b>	A Z coordinate, usually to move to	
<b>Innn</b>	Parameter - not currently used	
<b>Jnnn</b>	Parameter - not currently used	
<b>Fnnn</b>	Feedrate in mm per minute. (Speed of print head movement)	
<b>Rnnn</b>	Parameter - used for temperatures	
<b>Qnnn</b>	Parameter - not currently used	
<b>Ennn</b>	Length of extrudate in mm. This is exactly like X, Y and Z, but for the length of filament to extrude. It is common for newer stepper based systems to interpret ... Better: Skeinforge 40 and up interprets this as the absolute length of input filament to consume, rather than the length of the extruded output.	
<b>Nnnn</b>	Line number. Used to request repeat transmission in the case of communications errors.	
<b>*nnn</b>	Checksum. Used to check for communications errors	

# **G-CODES MACHINE CODE REFERENCE**

- G-code Table
- G00 - Rapid Linear Motion
- G01 - Linear Motion at Feed Rate
- G02 and G03 - Arc at Feed Rate
- G04 - Dwell
- G10 - Coordinate System Data Tool and Work Offset Tables
- G17, G18 and G19 - Plane Selection
- G20 and G21 - Length Units
- G28 and G30 - Return to Home
- G28.1 - Reference Axes
- G40, G41 and G42 - Cutter Radius Compensation
- G43, G44 and G49 - Tool Length Offsets
- G47 - Engrave Sequential Serial Number
- G53 - Move in Absolute Coordinates
- G54 to G59 and G59 P<sub>N</sub> - Select Work Offset Coordinate System
- G61 and G64 - Set Path Control Mode
- G73 - Canned Cycle - High Speed Peck Drill
- G80 - Cancel Modal Motion
- G81 to G89 - Canned Cycles
- G90 and G91 - Distance Mode
- G92, G92.1, G92.2 and G92.3 - G92 Offsets
- G93, G94 and G95 - Set Path Control Mode
- G98 and G99 - Canned Cycle Return Level

## ANEXO IV

El Anexo IV indica los valores de las fuerzas específicas de corte para los materiales de mecanizado más comúnmente empleados. En este caso  $P_s = K$ .

P Acero al carbono		
Dureza del material (N/mm2)	HB	K <sub>c0.4</sub>
200-400	100	1680
400-700	150	1860
700-950	230	1980

P Aleaciones y acero para herramientas		
Dureza del material (N/mm2)	HB	K <sub>c0.4</sub>
400-700	150	1680
700-950	230	2100
950-1200	310	2280
1200-1400	370	2580
1400-1600	420	2760
1600-1800	460	3000

M Aceros inoxidables		
Tipo	HB	K <sub>c0.4</sub>
Ferrítico	200	1680
Martensítico	300	2100
Austenítico	200	2280
Austenítico con titanio		2400
Maraging		2400

K Fundiciones		
Dureza del material (N/mm2)	HB	K <sub>c0.4</sub>
100-150	130	1100
150-220	180	1200
220-450	220	1500
450-650	250	1700
650-800	380	2300

N No férricos	
Tipo	K <sub>c0.4</sub>
Aluminio Si<12%	660
Aluminio Si>13%	900
Latón	700
Bronce	1000
Cobre	700
Aleaciones de cobre	1000
CuproNickel	1500
Magnesio	360
Oro	1200
Plástico	360

S Aleaciones termorresistentes	
Tipo	K <sub>c0.4</sub>
Aleaciones con base hierro	2900
Aleaciones refractarias base hierro recocido	3100
Aleaciones con base de níquel	3500
Aleaciones refractarias base níquel recocido	4200
Aleaciones con base de cobalto	3500
Aleaciones refractarias base cobalto recocido	4200
Titanio	1680

H Materiales endurecidos	
Dureza (HRC)	K <sub>c0.4</sub>
45	2850
50	3600
55	4400
60	5400

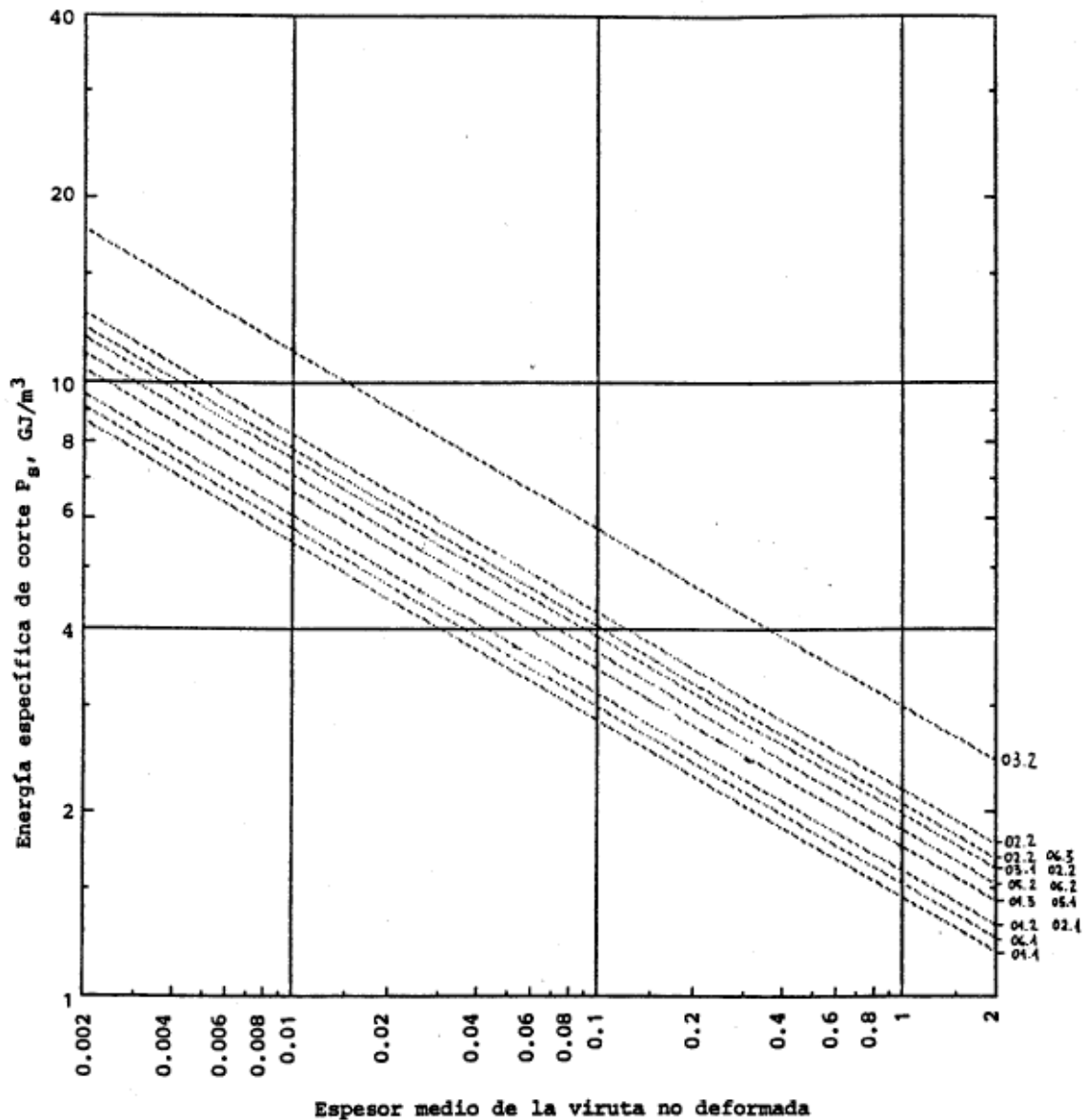
### Aluminio y no férricos

N Aluminio y no férricos		Operación	a <sub>p</sub> Profundidad de cote mm	f Avance mm/rev	Geometrías negativas <span style="border: 1px solid black; padding: 2px 10px;"> </span>							
					Designación de velocidad de cote / rompevirutas							
					Aleaciones de aluminio < 7% de silicio		Aleaciones de aluminio 7- 12% de silicio		Aleaciones de aluminio > 12% de silicio		Aleaciones de cobre	
					v <sub>c</sub> m/min	Geo. 1° 2°	v <sub>c</sub> m/min	Geo. 1° 2°	v <sub>c</sub> m/min	Geo. 1° 2°	v <sub>c</sub> m/min	Geo. 1° 2°
PCD. Diamante policristalino	D720 / PC30	D	1.3-9	0.1-0.6	>914	H o A	762-1372	H o A	457-914	H o A	244-366	H o A
		S	1.3-2.5	0.2-0.46	>914	A o H	914-1829	A o H	610-914	A o H	305-610	A o H
		A	0.25-1.3	0.08-0.2	>1829	A	>1829	A	610-1067	A	457-762	A

La profundidad de cote máxima no debe exceder la longitud del segmento. Remitirse al catálogo en la página 44 para las específicas capacidades de las placas.

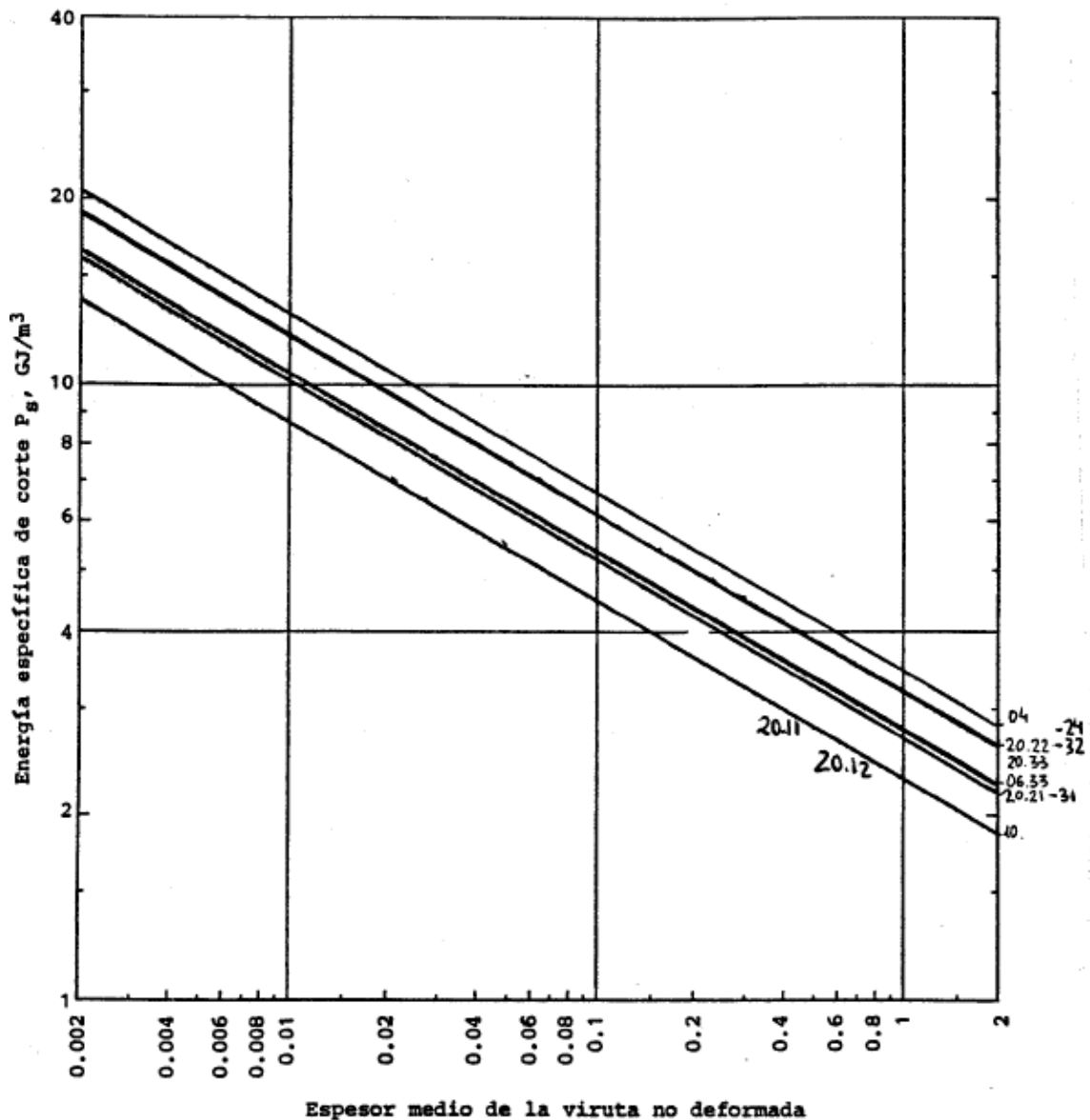
[illegible]

Valores de  $P_s$  para las herramientas de tipo P (materiales férreos de viruta larga, aceros).



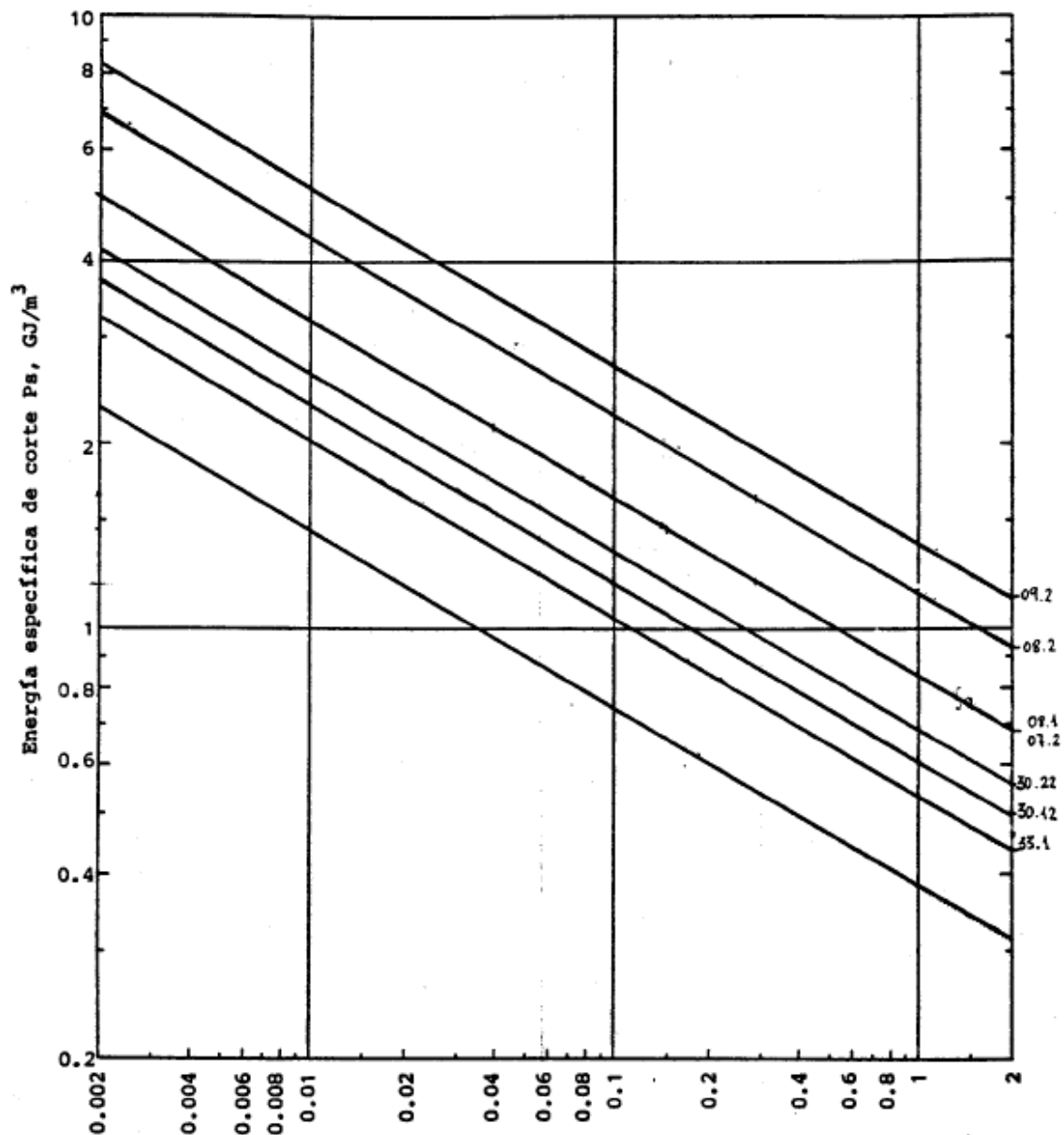
- 01.1 Acero al carbono no aleado (C=0.15%)
- 01.2 Acero al carbono no aleado (C=0.35%)
- 01.3 Acero al carbono no aleado (C=0.60%)
- 02.1 Acero aleado recocido
- 02.2 Acero aleado templado y revenido
- 03.1 Acero de alta aleación recocido
- 03.2 Acero de alta aleación endurecido
- 05.1 Acero inoxidable recocido martensítico/ferrítico
- 05.2 Acero inoxidable recocido austenítico
- 06.1 Fundiciones de acero no aleado
- 06.2 Fundiciones de acero de baja aleación
- 06.3 Fundiciones de acero de alta aleación

Valores de  $P_s$  para las herramientas de tipo M (aceros inoxidable).



- 04 Acero templado (endurecido)
- 06.33 Acero al manganeso
- 10 Fundición en coquilla
- 20.11 Aleaciones resistentes al calor, base de hierro, recocida
- 20.12 Aleaciones resistentes al calor, base de hierro, envejecida
- 20.21 Aleaciones resistentes al calor, base de níquel o cobalto, recocida
- 20.22 Aleaciones resistentes al calor, base de níquel o cobalto, envejecida
- 20.32 Aleaciones resistentes al calor, base de níquel o cobalto, envejecida
- 20.24 Aleaciones resistentes al calor, base de níquel o cobalto, fundida
- 20.33 Aleaciones resistentes al calor, base de níquel o cobalto, fundida

Valores de  $P_s$  para las herramientas de tipo K (materiales férreos de viruta corta, fundiciones).

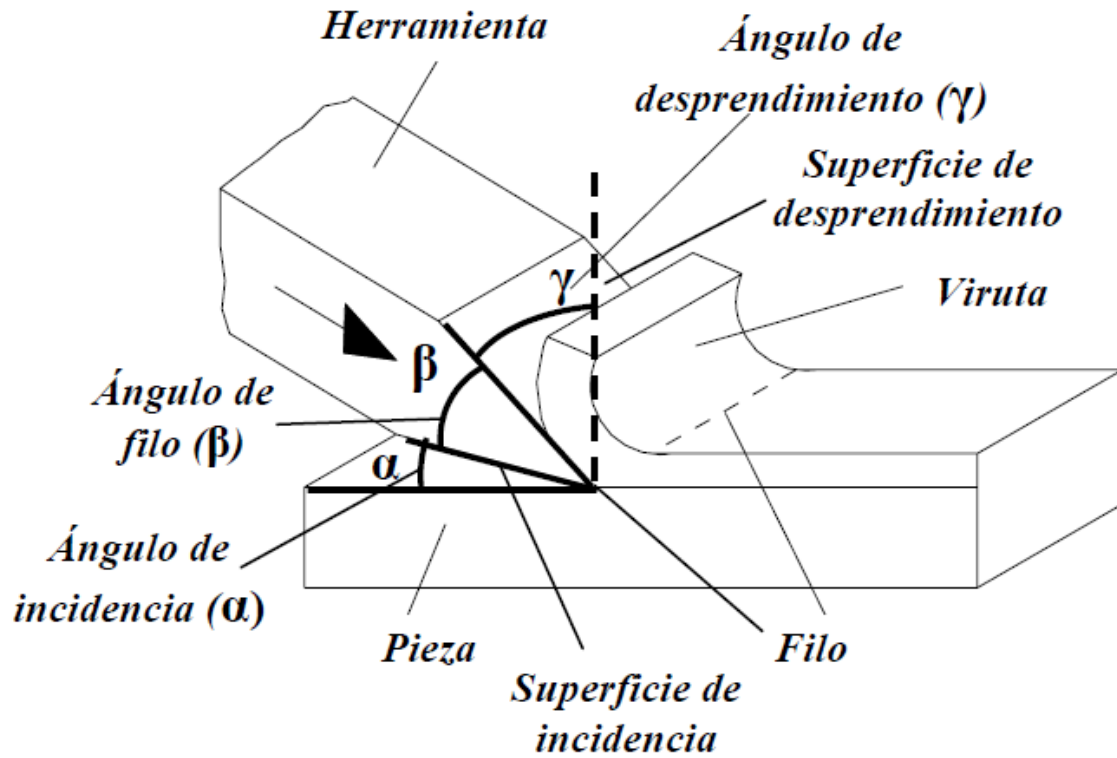


Espesor medio de la viruta no deformada

- 07.1 Fundición maleable ferrítica
- 07.2 Fundición maleable perlítica
- 08.1 Fundición baja resistencia
- 08.2 Fundición alta resistencia
- 09.1 Fundición nodular SG ferrítica
- 09.2 Fundición nodular SG perlítica
- 30.11 Aleaciones de aluminio no tratable por calentamiento
- 30.12 Aleaciones de aluminio tratable por calentamiento
- 30.21 y 30.22 Aleaciones de aluminio fundido
- 33.1, 33.2 y 33.3 Aleaciones de bronce-latón

## ANEXO V

En este Anexo se presenta una ilustración de las componentes angulares que actúan durante un desprendimiento de viruta por la acción de una herramienta de corte en un corte ortogonal.

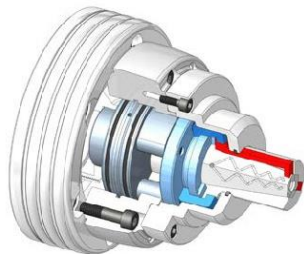


## ANEXO VI:

Catálogo Hainbuch 2016/17, *Special Segmented Mandrels, Type 213.*

### MANDRELS

#### Special segmented mandrels



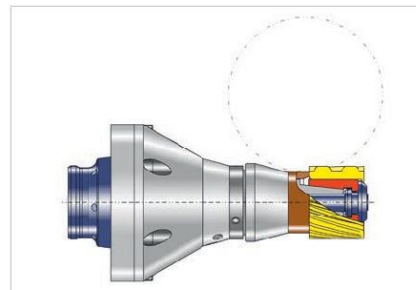
##### Mandrel SE

- Power actuated I.D. clamping for series production
- Compared with a round design, it has doubled clamping force and higher cutting performance
- Best process reliability and long service intervals
- Insensitive to dirt through the clamping pyramid instead of clamping taper



##### Mandrel type 213

- Rigid, slim mandrel for gear cutting
- Workpiece stabilization through axial draw force applied against the workpiece end-stop
- Large clamping range and vibration dampening due to vulcanized clamping elements
- Segmented clamping bushing coupled in draw bolt



Gear cutting



## ANEXO VII:

### Ficha de características técnicas del PLA inicial.

# Datasheet



## PLA Extrafill

### Description:

Fillamentum PLA Extrafill is a material for the FFF (also known as FDM) 3D printing technology.

The advantage of this material is that it can be used in 3D printers easily, that it allows a high quality of printing even in tricky details and an excellent lamination of the printed object.

PLA filament is made of natural ingredients and is easily biodegradable by composting.

Fillamentum guarantees high precision of filament dimensions within the tolerance of +/- 0,05 mm, which is strictly controlled throughout the production.

Printing filaments reported on the marked under the trademark Fillamentum are produced in a wide variety of colours in accordance with the colour charts RAL and Pantone, and also in own unique colour ranges.



Physical properties	Typical Value	Test Method	Test Condition
Material density	1,24 g/cm <sup>3</sup>	ASTM D1505	
Diameter tolerance	± 0,01 mm		
Weight	750 g of filament (+ 250 g spool)		

Mechanical properties	Typical Value	Test Method	Test Condition
Tensile strength	110 MPa	ASTM D682	MD (film oriented 3,5x)
	145 MPa	ASTM D682	TD (film oriented 5x)
Tensile modulus	3310 MPa	ASTM D682	MD
	3860 MPa	ASTM D682	TD
Elongation at break	160 %	ASTM D682	MD
	100 %	ASTM D682	TD
Elmendorf tear	0,6 g/micron	ASTM D1922	MD
	0,25 g/micron	ASTM D1922	TD

Thermal properties	Typical Value	Test Method	Test Condition
Melting temperature	145-160 °C		
Glass transition temperature	55-60 °C		
Flammability	388 °C		Autoignition temperature

Printing properties	Typical Value	Test Method	Test Condition
Print temperature	170-185 °C		
Hot pad	40-50 °C		
Speed of printing	30-40 mm/min		

Optical properties	Typical Value	Test Method	Test Condition
Haze	2,1 %	ASTM D1003	
Gloss	90	ASTM D1003	20 °

Workability of 3D printing filament is at least 12 months from delivery.  
The information was processed with the best knowledge of the manufacturer and it is for information only.

Fillamentum  
nárn. Míru 1217, 768 24 Hulín  
Czech Republic

(+420) 725 463 731  
helpdesk@fillamentum.com  
www.fillamentum.com

# Datasheet



## PLA Extrafill

### Description:

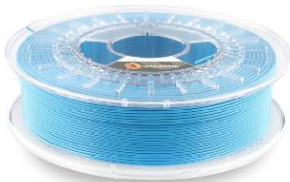
Fillamentum PLA Extrafill is a material for the FFF (also known as FDM) 3D printing technology.

The advantage of this material is that it can be used in 3D printers easily, that it allows a high quality of printing even in tricky details and an excellent lamination of the printed object.

PLA filament is made of natural ingredients and is easily biodegradable by composting.

Fillamentum guarantees high precision of filament dimensions within the tolerance of  $\pm 0,05$  mm, which is strictly controlled throughout the production.

Printing filaments reported on the marked under the trademark Fillamentum are produced in a wide variety of colours in accordance with the colour charts RAL and Pantone, and also in own unique colour ranges.



Physical properties	Typical Value	Test Method	Test Condition
Material density	1,24 g/cm <sup>3</sup>	ASTM D792	
Melt flow index	6 g/10 min	ASTM D1238	210 °C; 2,16 kg
Diameter tolerance	$\pm 0,05$ mm		
Weight	750 g of filament (+ 250 g spool)		

Mechanical properties	Typical Value	Test Method	Test Condition
Tensile strength	53 MPa	ASTM D682	
Elongation at break	6 %	ASTM D682	
Tensile modulus	3600 MPa	ASTM D682	
Flexural strength	83 MPa	ASTM D790	
Flexural modulus	3800 MPa	ASTM D790	
Izod impact strength	16 J/m	ASTM D256	23 °C, notched

Thermal properties	Typical Value	Test Method	Test Condition
Glass transition temperature	55-60 °C	ASTM D3418	
Heat distortion temperature	55 °C	ASTM E2092	0,45 MPa

Printing properties	Typical Value	Test Method	Test Condition
Print temperature	190-210 °C		
Hot pad	40-50 °C		
Speed of printing	30-40 mm/min		

Workability of 3D printing filament is at least 12 months from delivery.  
The information was processed with the best knowledge of the manufacturer and it is for information only.

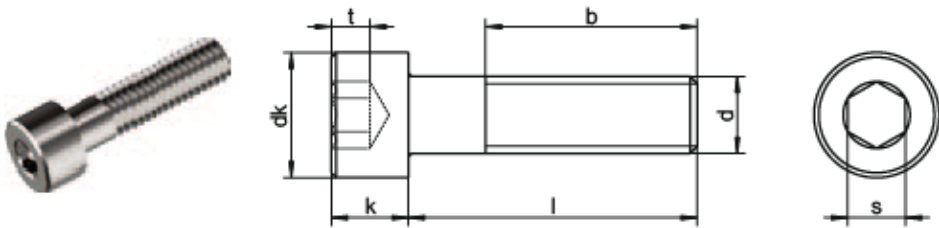
Fillamentum  
nám. Míru 1217, 768 24 Hulin  
Czech Republic

(+420) 725 463 731  
helpdesk@fillamentum.com  
www.fillamentum.com

ANEXO VIII:

Tabla normalizada de tornillo Allen cilíndrico.

**DIN 912 - Página 1** - sim. ISO 4762  
Tornillo Allen cilíndrico



dk max.	3,0	3,8	4,5	5,5	7,0	8,5	10,0	13,0	16,0	18,0	21,0	24,0	27,0
k max.	1,6	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0	6,0	8,0	10,0	12,0	14,0	16,0	18,0
s	1,5	1,5	2	2,5	3	4	5	6	8	10	12	14	14
b	15	16	17	18	20	22	24	28	32	36	40	44	48
t	0,7	1,0	1,1	1,3	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0
●	1,5	1,5	2	2,5	3	4	5	6	8	10	12	14	14
Long. / Ø	M1,6	M2	M2,5	M3	M4	M5	M6	M8	M10	M12	M14	M16	M18
3	▲●	▲●											
4	▲●	▲●	▲●	▲●									
5	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●								
6	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●						
8	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●						
10	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●					
12	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●				
14	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●				
16	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●			
18		▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●			
20		▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●		
22			▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	
25			▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	
30				▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●
35				▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●
40				▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●
45				▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●
50				▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●
55					▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●
60					▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●
65					▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●
70					▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●
75					▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●
UV	1000	1000	1000	1000 ≥ 45 500	1000 ≥ 35 500	500 ≥ 45 200	500 ≥ 45 200 ≥ 75 100	200 ≥ 45 100	100	100 ≥ 55 50	25	25	25

■ A1 / ▲ A2 / ● A4 | UV: Unidad de venta | Todas las medidas en mm | Otras dimensiones bajo pedido  
Ejemplo Art.-Nr.: 912-2-8X40 DIN 912 - A2 - M8 - l = 40mm

## ANEXO IX:

Dimensiones de la nariz de husillo según Norma UNE-ISO 702-1:2011.

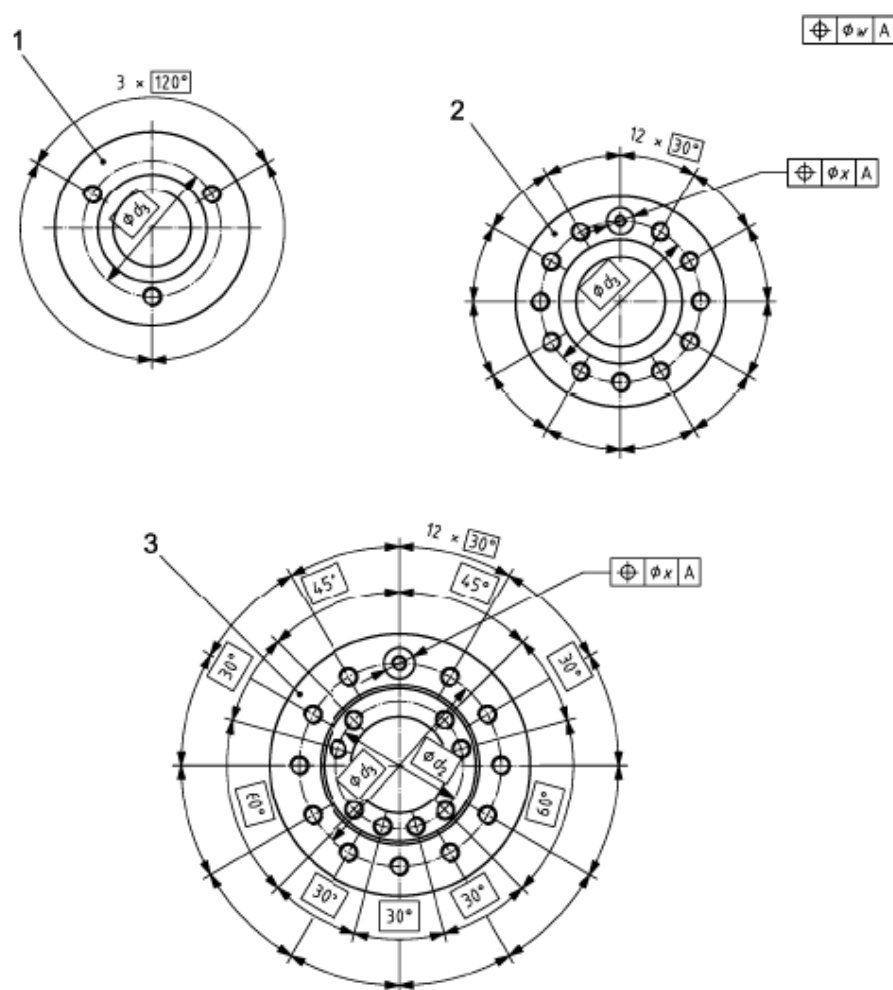


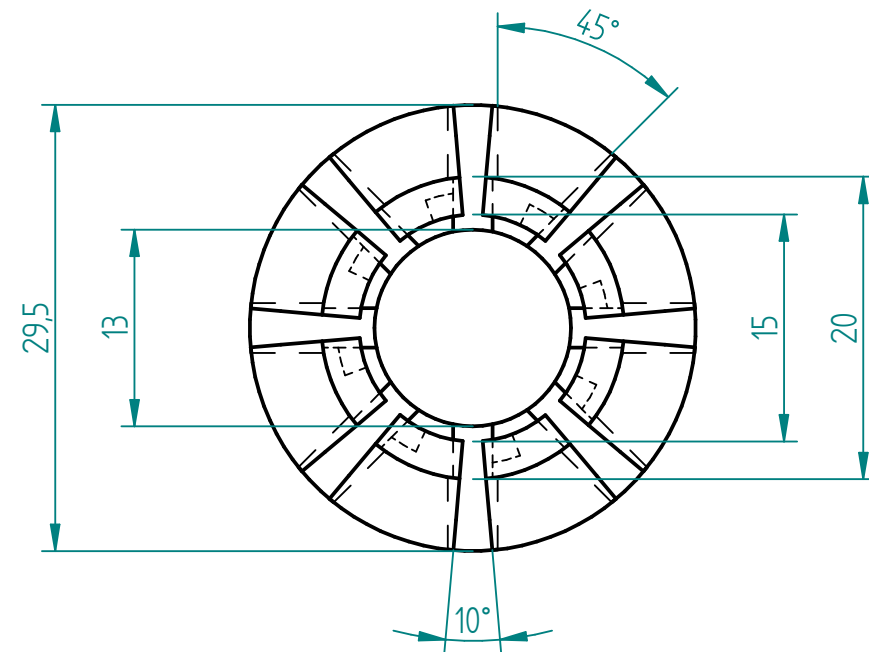
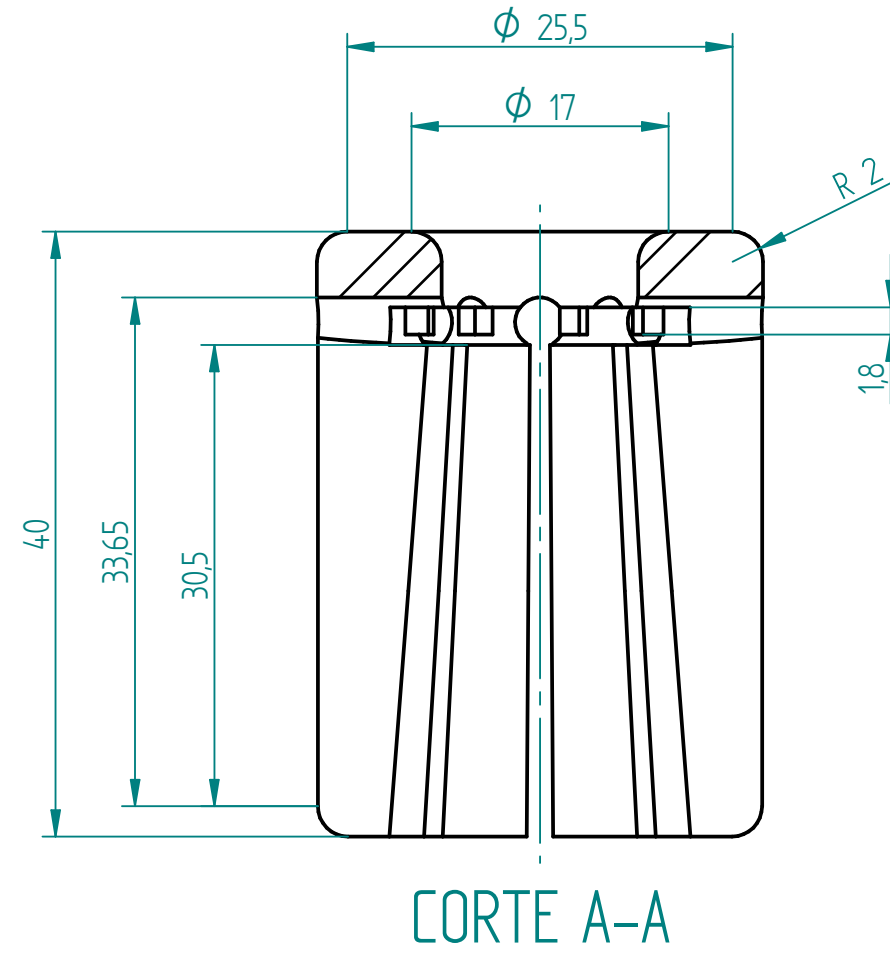
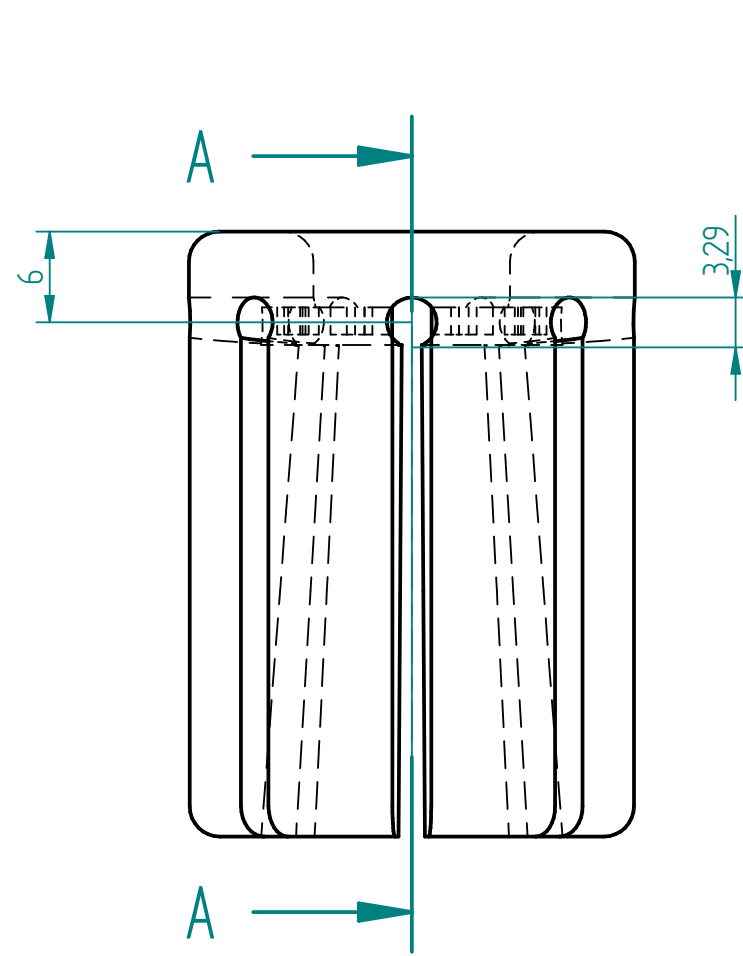
Figura 1 (continúa)

**Tabla 1 – Cotas de nariz del husillo**

Dimensión		N°								
		3	4	5	6	8	11	15	20	28
$d_1$	nom.	53,975	63,513	82,563	106,375	139,719	196,869	285,775	412,775	584,225
	tol.	+0,008 -0	+0,008 -0	+0,010 -0	+0,010 -0	+0,012 -0	+0,014 -0	+0,016 -0	+0,020 -0	+0,023 -0
$d_2$		—	—	61,9	82,6	111,1	165,1	247,6	368,3	530,2
$d_3$		70,6	82,6	104,8	133,4	171,4	235	330,2	463,6	647,6
$d_4$		92	108	133	165	210	280	380	520	725
$d_5$		M10	M10	M10	M12	M16	M20	M24	M24	M30
$d_6$ H8/h8		—	14,25	15,9	19,05	23,8	28,6	34,9	41,3	50,8
$l_1$ (Tipo A1)	$0$ -0,025	—	—	14,288	15,875	17,462	19,050	20,638	22,225	25,400
$l_1$ (Tipo A2)		11	11	13	14	16	18	19	21	24
$l_2$		16	20	22	25	28	35	42	48	56
$l_3$		—	5	5	5	6	8	8	8	8
$l_4$		14	17	19	22	25	32	37	42	50
w y x		0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3

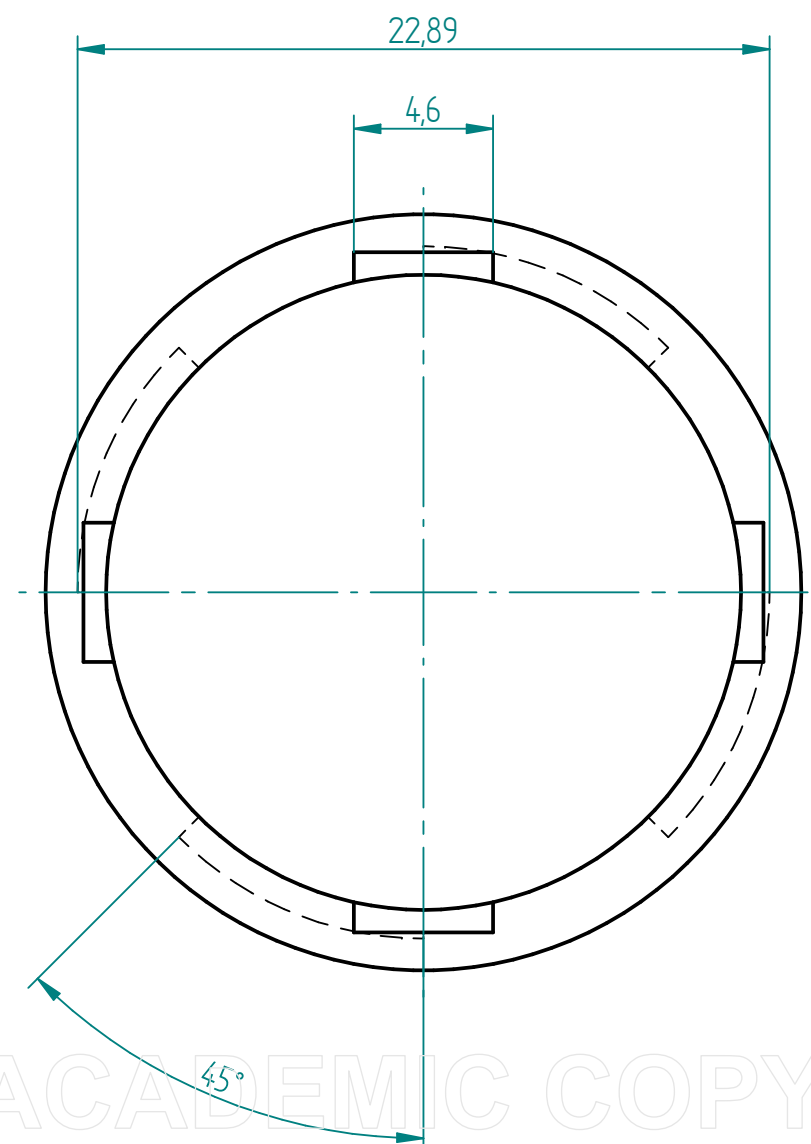
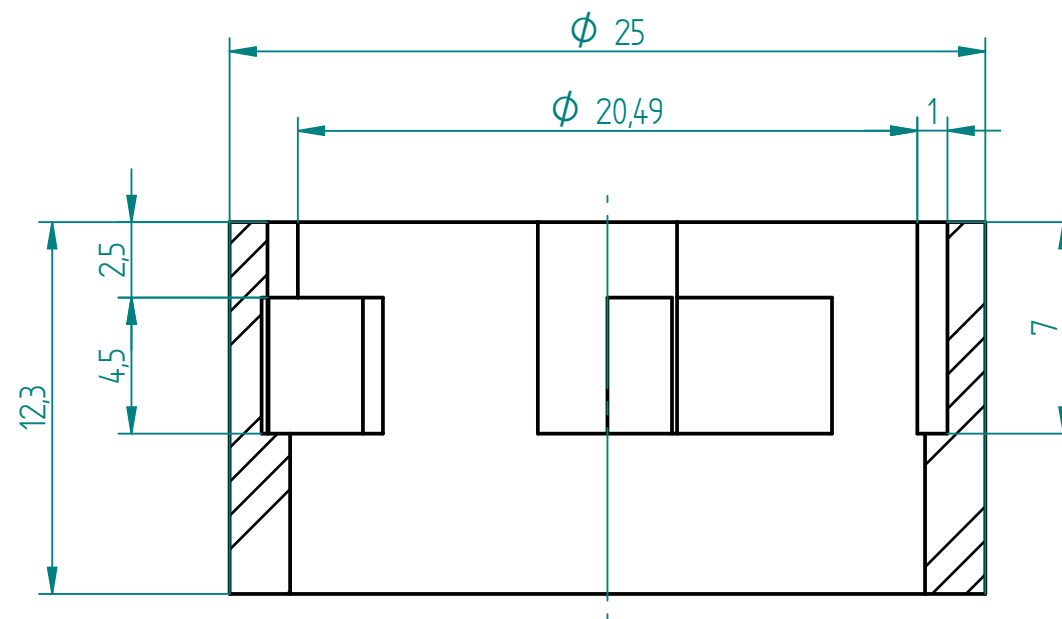
NOTA La tolerancia general para cotas sin indicación de tolerancia es  $\pm 0,4$  mm.

## ANEXO PLANOS



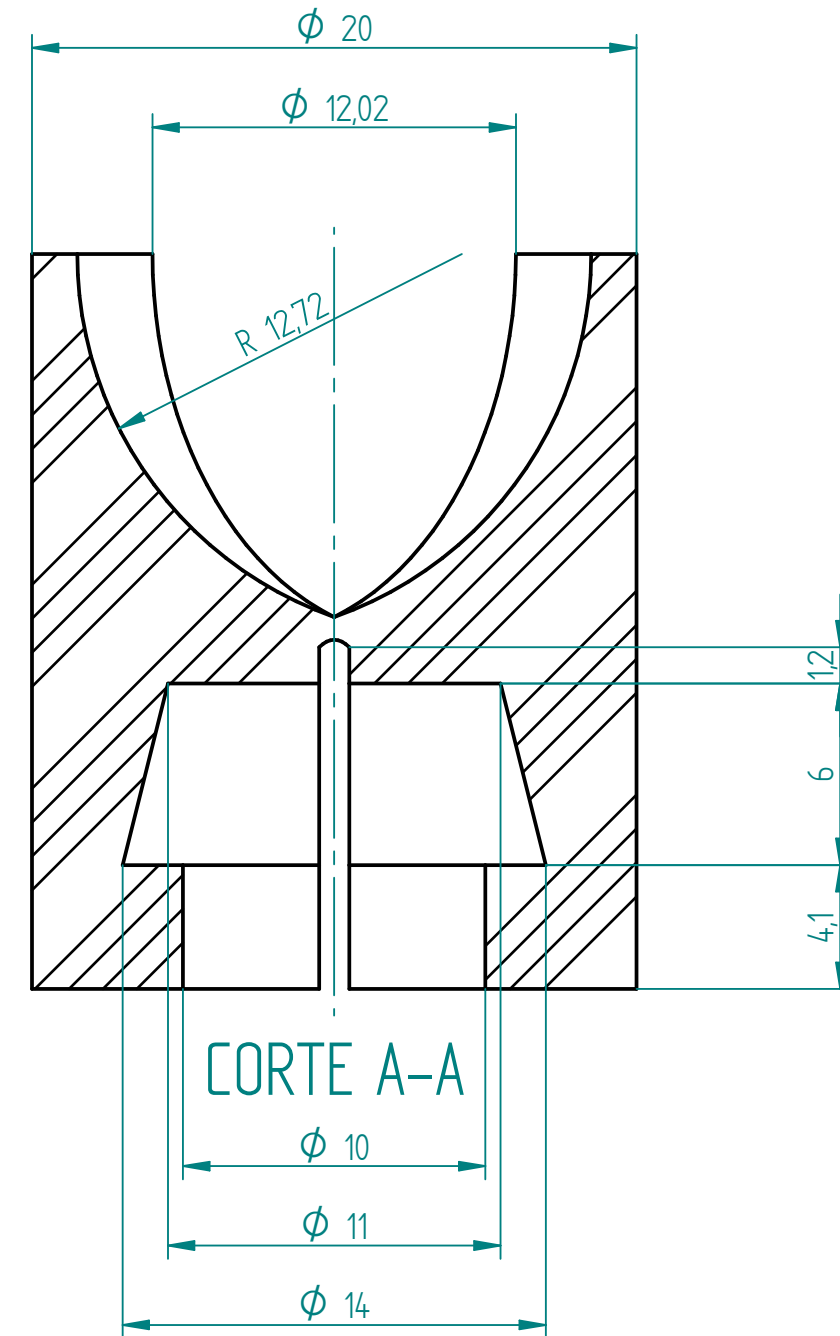
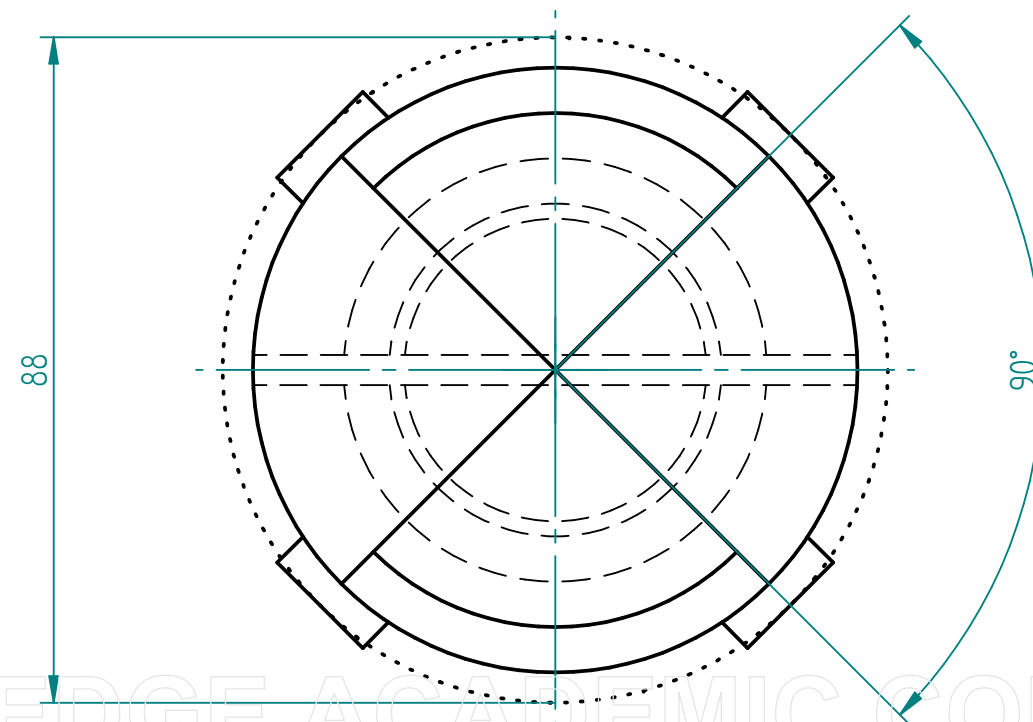
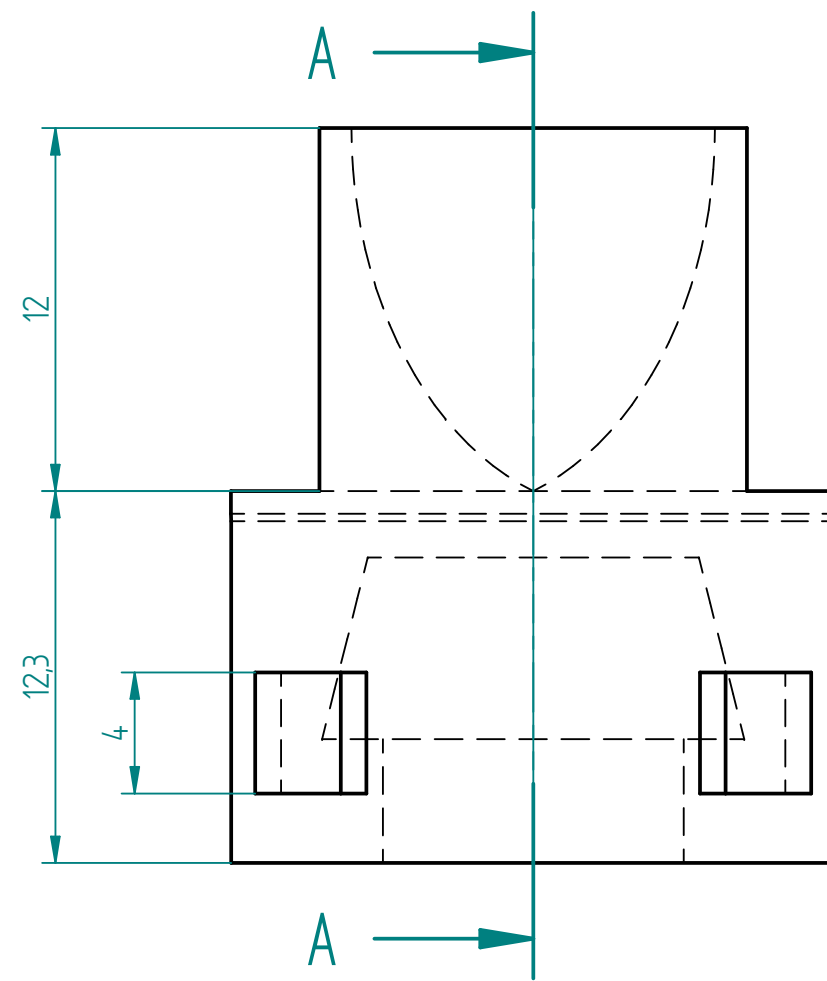
	Nombre	Fecha	Grado en Ingeniería Mecánica		uc3m   Universidad Carlos III de Madrid	
Dibujado	Manuel CR	13/05/2018				
Comprobado	Enrique SH		Título:  Pinza Expansible Ø25mm			
Aprobado 1						
Aprobado 2						
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0,5 y ±1º			A3	Nº de Plano: Plano 1/8	Rev	
			Idioma: es			
			Escala: 2:1	Peso: 9g		

SOLID EDGE ACADEMIC COPY

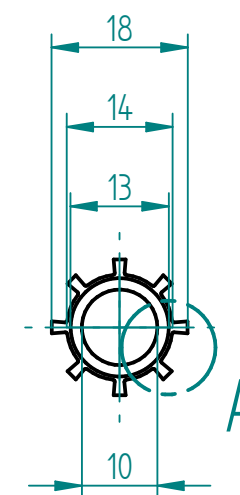
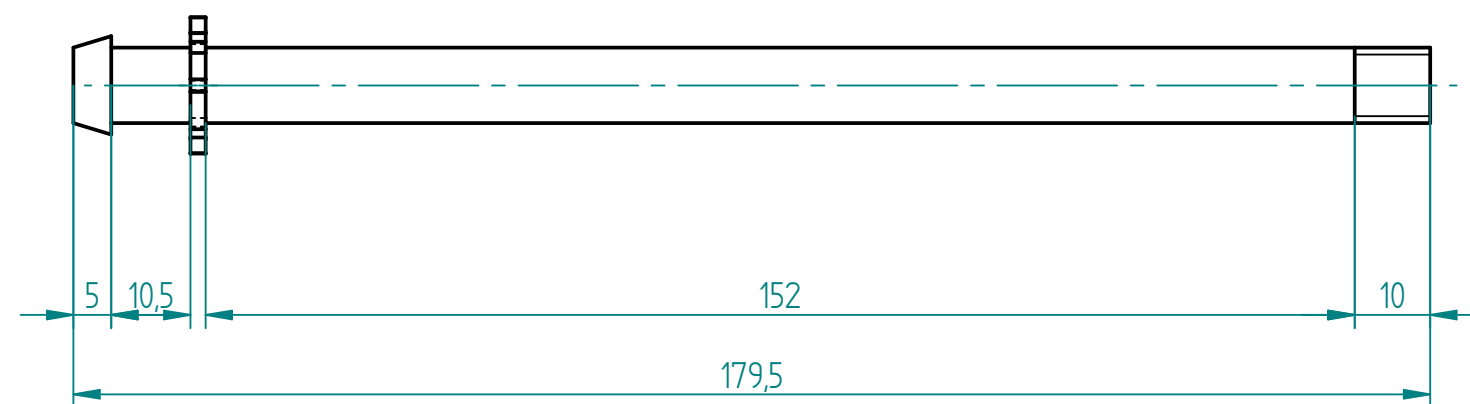


	Nombre	Fecha	Grado en Ingeniería Mecánica		uc3m	Universidad Carlos III de Madrid	
Dibujado	Manuel CR	13/05/2018					
Comprobado	Enrique SH		Título:  Aro de Apriete				
Aprobado 1							
Aprobado 2							
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0,5 y ±1°			A3	Nº de Plano: Plano 2/8	Rev		
			Idioma: es				
			Escala: 4:1		Peso: 2g		



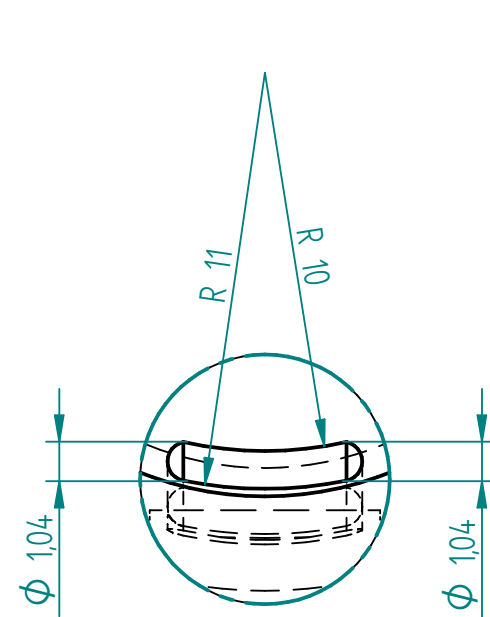
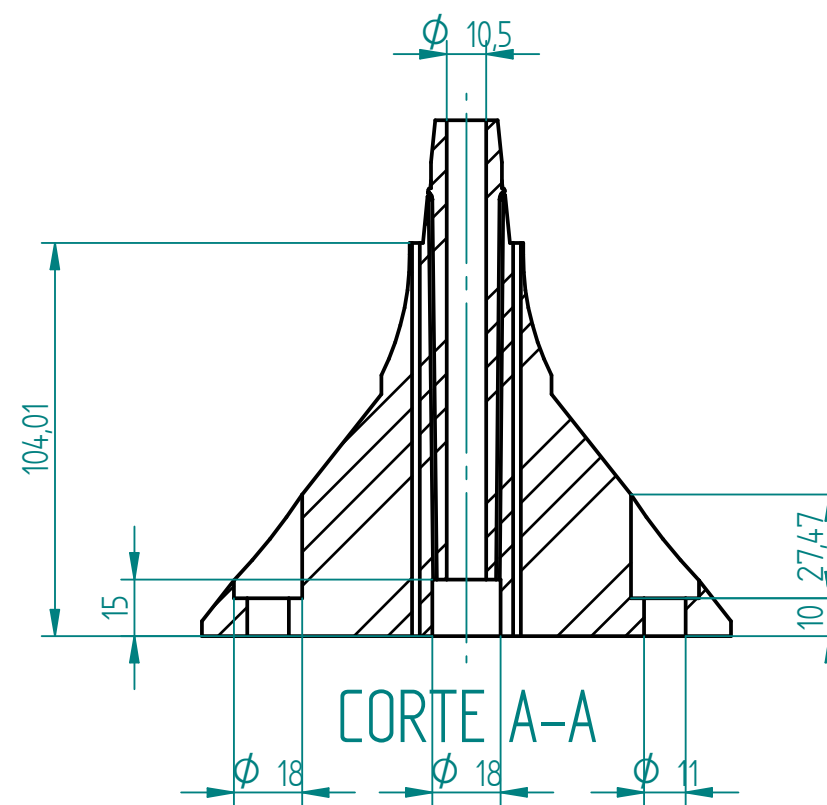
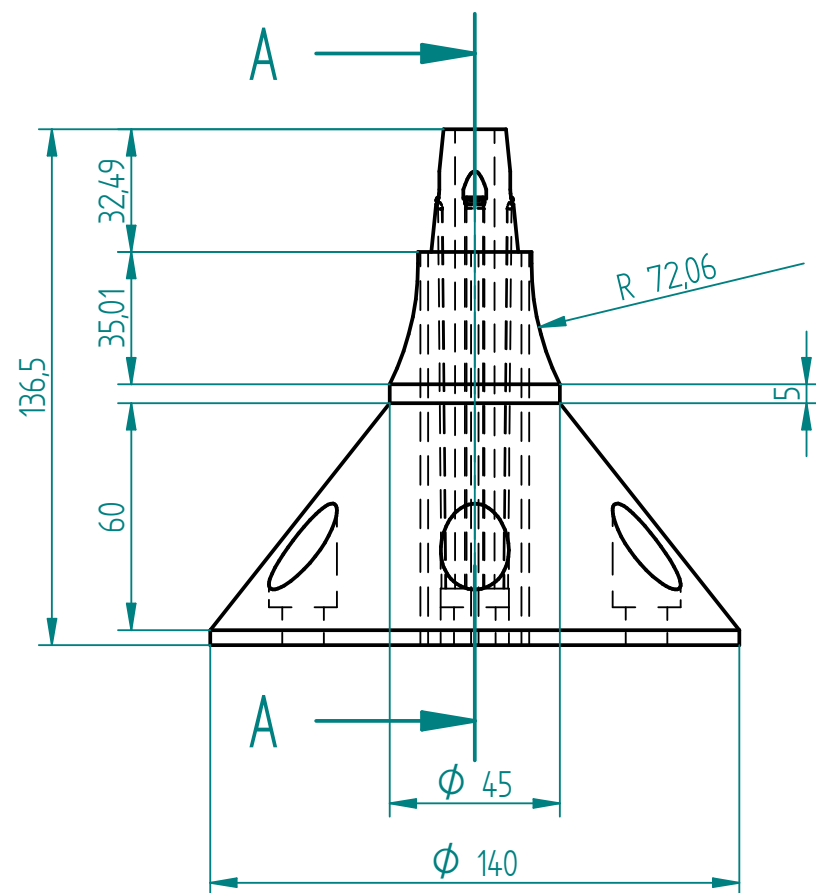


	Nombre	Fecha	Grado en Ingeniería Mecánica		uc3m   Universidad Carlos III de Madrid		
Dibujado	Manuel CR	13/05/2018					
Comprobado	Enrique SH						
Aprobado 1							
Aprobado 2							
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0,5 y ±1º			Título:  Pieza del Pistón				
			A3	Nº de Plano: Plano 3/8		Rev	
			Idioma: es				
			Escala: 4:1		Peso: 5g		

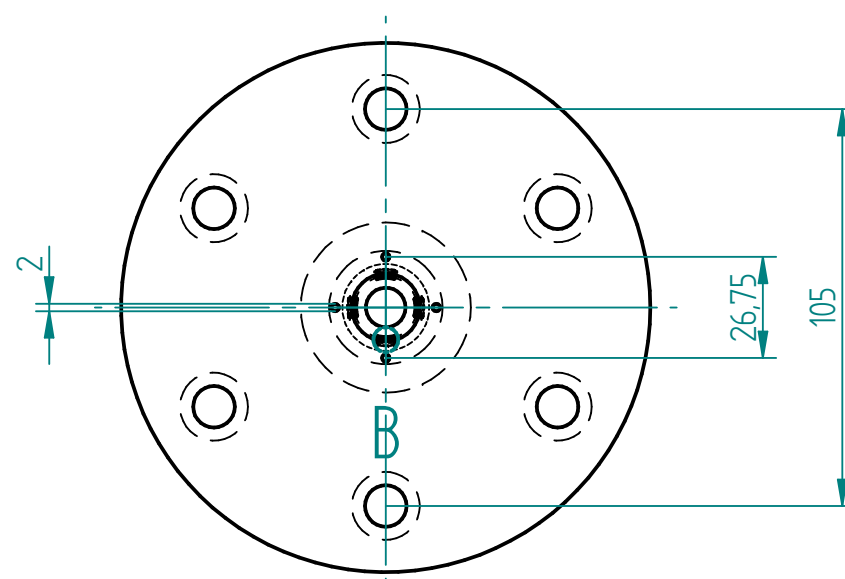


SOLID EDGE ACADEMIC COPY

	Nombre	Fecha	Grado en Ingeniería Mecánica		uc3m   Universidad Carlos III de Madrid		
Dibujado	Manuel CR	13/05/2018					
Comprobado	Enrique SH						
Aprobado 1			Título:  Pistón				
Aprobado 2							
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0,5 y ±1°			A3	Nº de Plano:  Plano 4/8	Rev		
			Idioma: es				
			Escala: 1:1		Peso: 18g		

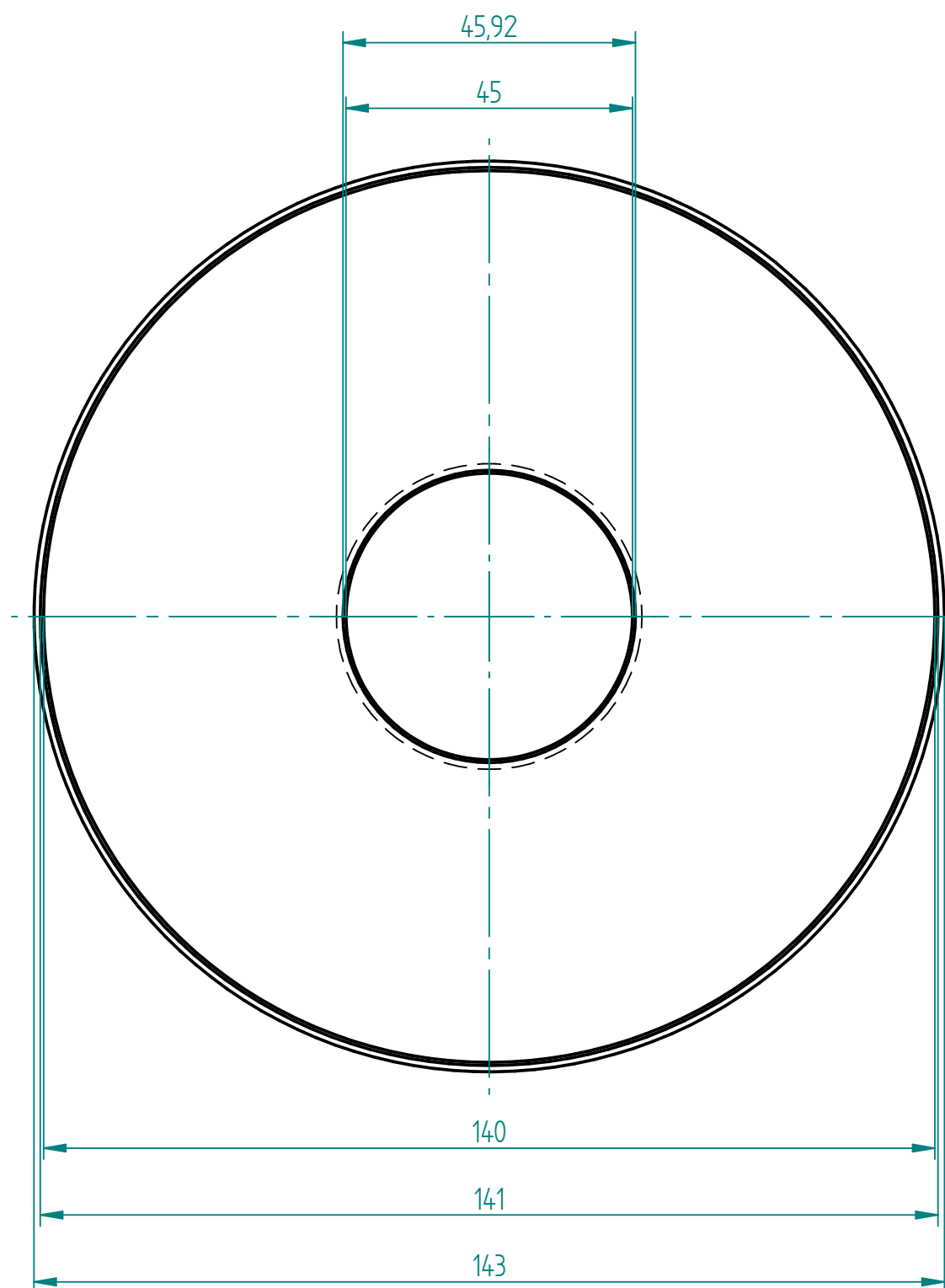
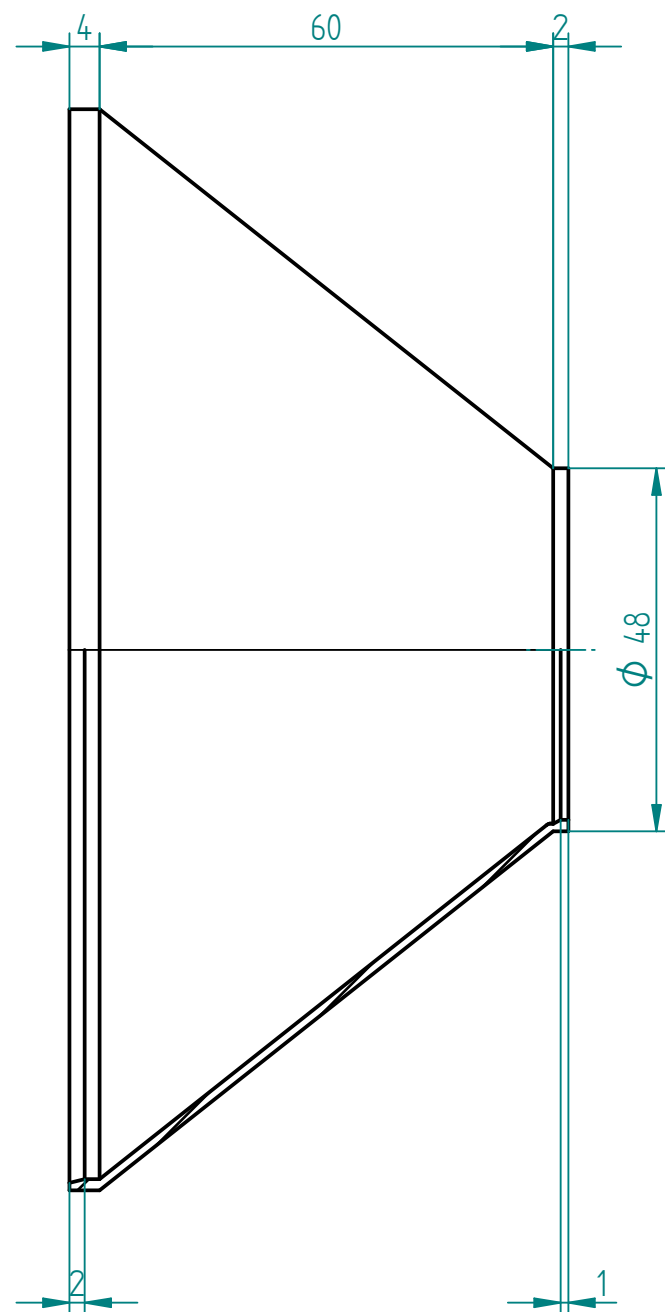


DETALLE B



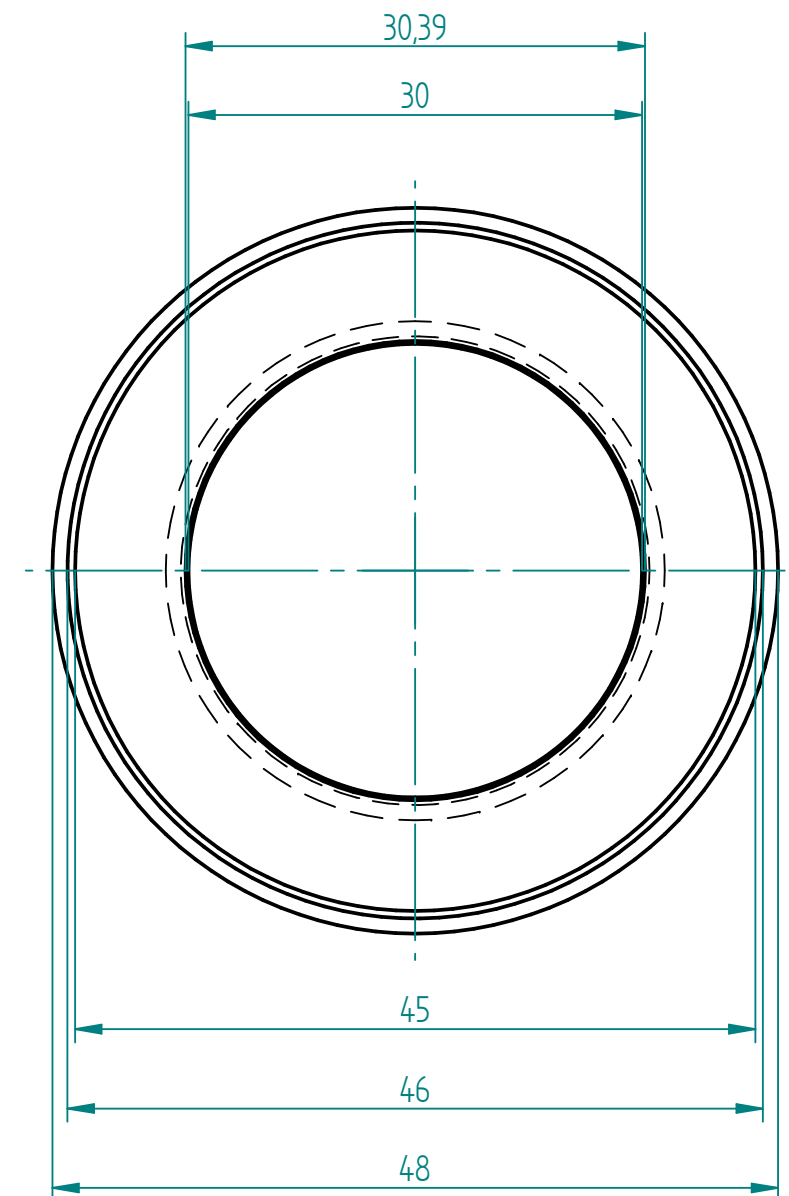
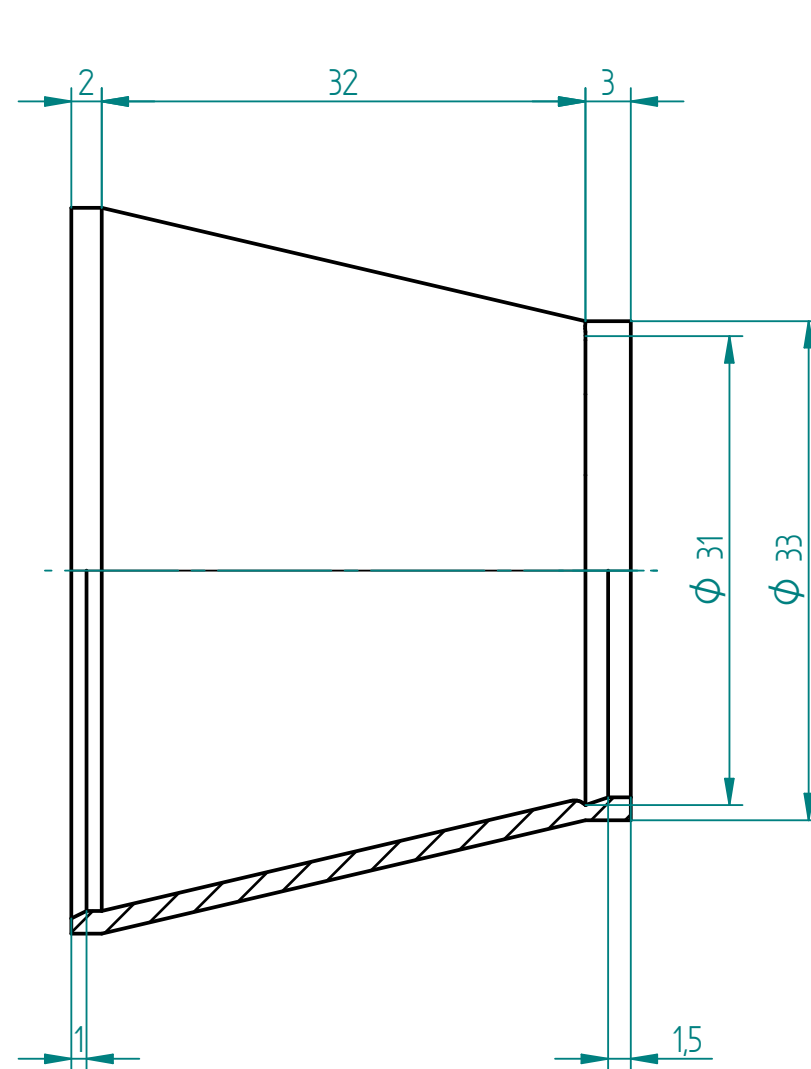
SOLID EDGE ACADEMIC COPY

	Nombre	Fecha	Grado en Ingeniería Mecánica		uc3m   Universidad Carlos III de Madrid	
Dibujado	Manuel CR	13/05/2018				
Comprobado	Enrique SH		Título:  Plato Cónico			
Aprobado 1						
Aprobado 2						
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0,5 y ±1°			A3	Nº de Plano: Plano 5/8	Rev	
			Idioma: es			
			Escala: 1:2	Peso: 615g		



SOLID EDGE ACADEMIC COPY

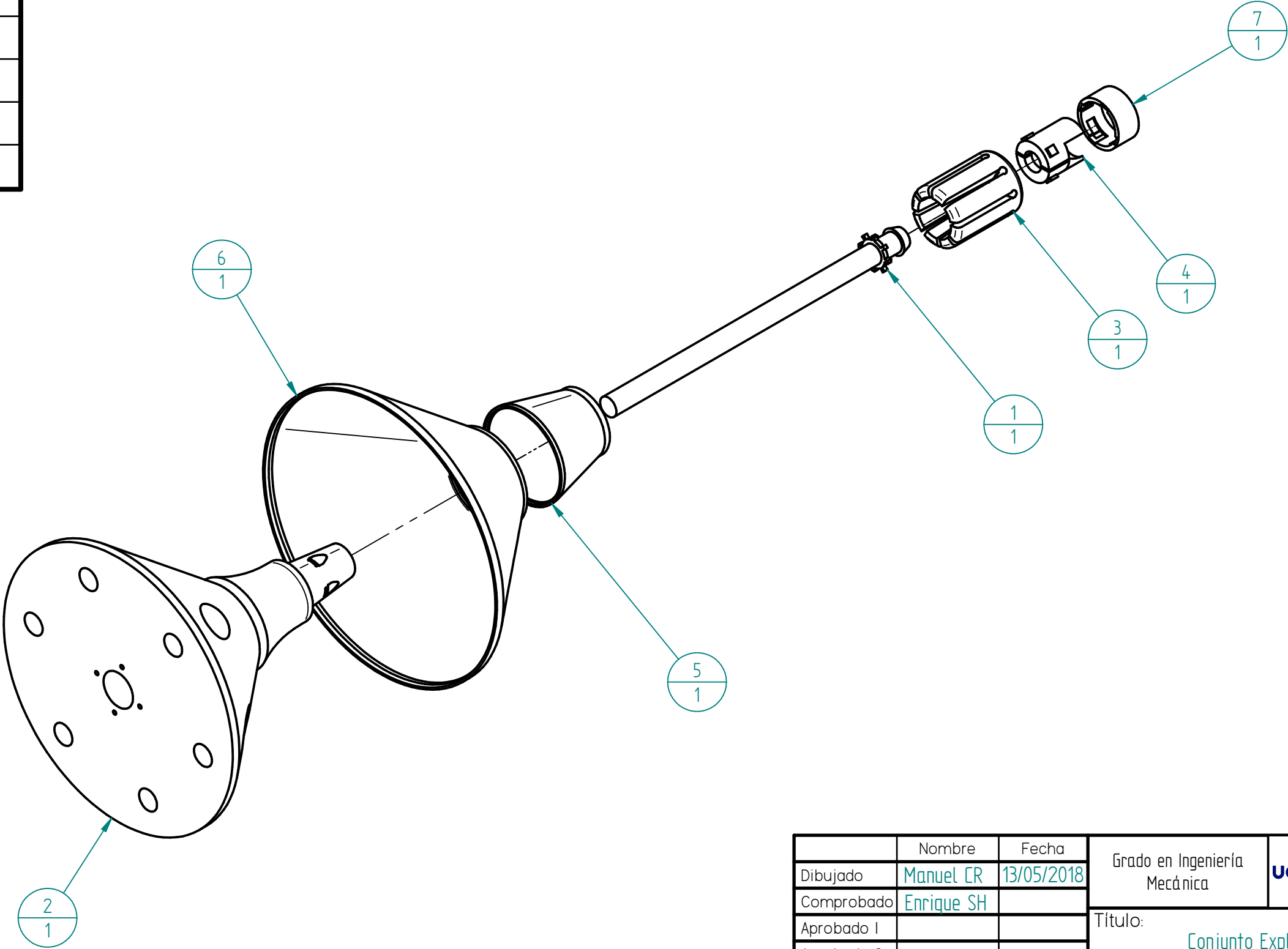
	Nombre	Fecha	Grado en Ingeniería Mecánica		<div>uc3m   Universidad Carlos III de Madrid</div>	
Dibujado	Manuel CR	13/05/2018				
Comprobado	Enrique SH		Título:  Carcasa Cónica Grande			
Aprobado 1						
Aprobado 2						
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0,5 y ±1°			A3	Nº de Plano: Plano 6/8	Rev	
			Idioma: es			
			Escala: 1:1	Peso: 36g		



SOLID EDGE ACADEMIC COPY

	Nombre	Fecha	Grado en Ingeniería Mecánica		uc3m	Universidad Carlos III de Madrid	
Dibujado	Manuel CR	13/05/2018					
Comprobado	Enrique SH		Título:  Carcasa Cónica Pequeña				
Aprobado 1							
Aprobado 2							
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0,5 y ±1°			A3	Nº de Plano: Plano 7/8	Rev		
			Idioma: es				
			Escala: 2:1		Peso: 8g		

Número de elemento	Nombre archivo (sin extensión)	Cantidad
1	Pistón	1
2	Plato cónico	1
3	Pinza expansible	1
4	Pieza del pistón	1
5	Carcasa cónica pequeña	1
6	Carcasa cónica grande	1
7	Aro de apriete	1



	Nombre	Fecha	Grado en Ingeniería Mecánica		uc3m   Universidad Carlos III de Madrid		
Dibujado	Manuel CR	13/05/2018					
Comprobado	Enrique SH						
Aprobado 1							
Aprobado 2			Título: Conjunto Explosionado				
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0,5 y ±1°			A3	Nº de Plano: Plano 8/8	Rev		
			Idioma: es				
			Escala: 1:2		Peso: 693g		